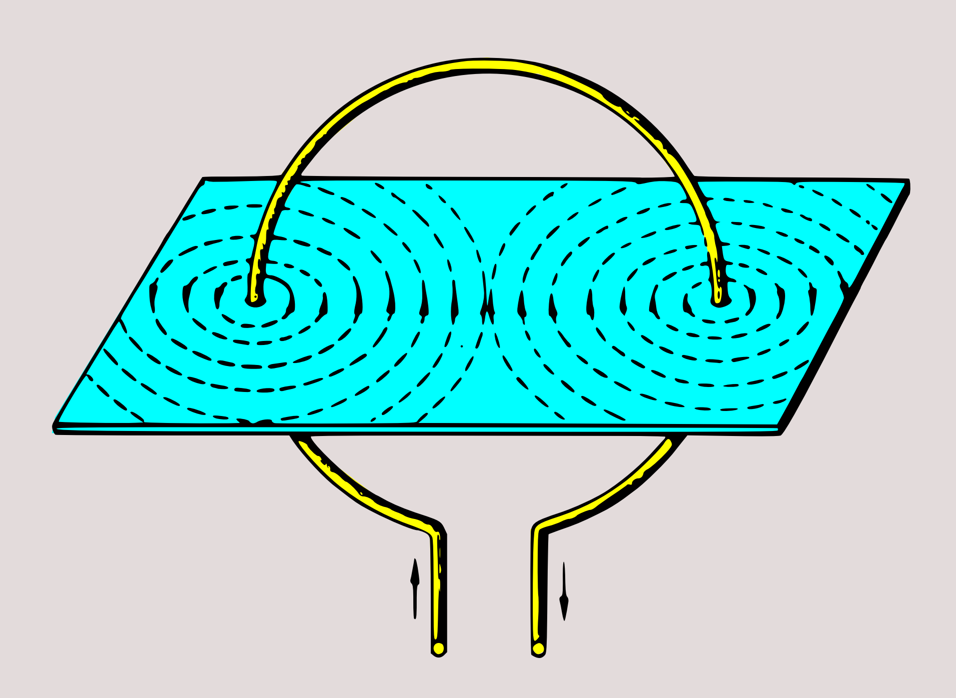
M. Kouznetsov

ÉLÉMENTS D'ÉLECTRO-TECHNIQUE



Éditions Mir Moscou

М. И. КУЗНЕЦОВ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫСШАЯ ШКОЛА»
МОСКВА

M. KOUZNETSOV

ÉLÉMENTS D'ÉLECTROTECHNIQUE

ÉDITIONS MIR · MOSCOU · 1970

CDU 621.3 (075.3)=40

Traduit du russe par Ch. BIR

Ce manuel est destiné aux élèves des écoles techniques professionnelles formant des cadres de techniciens-électriciens.

L'auteur du manuel nous fournit des notions essentielles sur l'électrostatique, l'électromagnétisme, l'induction magnétique; il examine les effets chimiques et thermiques du courant électrique, expose les lois fondamentales du courant continu. Une place importante est réservée à la description des moteurs asynchrones et synchrones, des machines à courant continu, des redresseurs, des transformateurs et des appareils de mesure électriques. Le livre comporte des renseignements sur la commande électrique et les accumulateurs, de même que des conseils sur la prévention des accidents.

La plupart des chapitres comportent en complément des exemples et des exercices que le lecteur pourra résoudre par lui-même.

Cet ouvrage a soutenu huit éditions en russe, deux éditions en espagnol, et a été traduit en anglais.

На французском языке

CHAPITRE PREMIER

ÉLECTROSTATIQUE

§ 1. MOLÉCULES ET ATOMES

En étudiant au cours des siècles les différentes substances dont est formé l'univers qui nous entoure, les savants sont arrivés à la conclusion que malgré leur diversité elles sont toutes composées d'éléments simples. On a établi l'existence dans la nature de 102 éléments chimiques. Chaque élément se compose de particules infimes appelées atomes. Les atomes de différents éléments ne se ressemblent pas et possèdent des propriétés qui sont particulières à chacun d'eux. Au contraire, les atomes d'un élément donné sont identiques et conservent toutes les caractéristiques de cet élément. On appelle *isotopes* les atomes d'un même élément chimique possédant la même valeur de la charge du noyau atomique mais qui diffèrent par leur masse et par leurs propriétés physiques et chimiques. Dans le Tableau périodique des éléments (Tableau de Mendéléev) les isotopes d'un élément occupent la même case. La combinaison d'atomes identiques constitue un corps simple et celle d'atomes différents forme un corps composé. Un groupe d'atomes chimiquement liés entre eux est appelé *molécule.* Ainsi, par exemple, la molécule d'eau comprend trois atomes: deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène. La molécule d'acide sulfurique comprend deux atomes d'hydrogène, un atome de soufre et quatre atomes d'oxygène. Les molécules de certains acides comprennent des centaines d'atomes. La molécule d'albumine est formée des milliers d'atomes d'hydrogène, de carbone, d'oxygène, d'azote, de phosphore et de soufre.

En étudiant les propriétés des différents éléments, en 1869, le célèbre chimiste russe D. Mendéléev avait rangé tous les éléments qui étaient alors connus dans l'ordre de croissance de leur poids atomique en commençant par

l'hydrogène léger et finissant par les atomes lourds de plomb et de bismuth. Il avait remarqué en l'occurrence que les propriétés physiques et chimiques des éléments se répétaient périodiquement. En tenant compte de la valeur du poids atomique et des propriétés des éléments, Mendéléev avait divisé son tableau en 92 cases, dans lesquelles il avait introduit les 64 éléments connus à l'époque. Persuadé d'avoir découvert une loi importante de la nature, il avait supposé l'existence d'éléments, qui n'étaient pas encore découverts, et fourni la caractéristique de leurs principales propriétés. Plus tard la découverte du gallium, du scandium, du germanium et d'autres éléments confirma l'hypothèse de Mendéléev.

§ 2. NOTIONS GÉNÉRALES D'ÉLECTRICITÉ ET DE THÉORIE ÉLECTRONIQUE

On admettait depuis longtemps que les atomes étaient des parcelles initiales, insécables et invariables de tous les corps existant dans la nature (« atomos» en ancien grec signifiait « indivisible »).

A la fin du dernier siècle, en faisant passer un courant électrique de haute tension à travers un tube rempli de gaz fortement raréfié, les physiciens ont remarqué une lueur verdâtre du verre du tube provoquée par l'action de rayons invisibles. La tache luminescente était située en face de l'électrode reliée au pôle négatif (cathode) de la source de courant. Pour cette raison, ces rayons ont reçu le nom de rayons cathodiques. Sous l'action du champ magnétique la tache cathodique se déplaçait latéralement. Les rayons cathodiques se comportaient de la même façon qu'un conducteur placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant. La tache verdâtre était également déviée par un champ électrique : un corps chargé positivement attirait les rayons cathodiques, tandis qu'un corps chargé négativement les repoussait. Cela a conduit à l'idée que les rayons cathodiques représentaient un flux de particules négatives, autrement dit un flux d'électrons.

En 1895, le physicien allemand Rœntgen avait découvert les rayons X, invisibles à l'œil nu mais capables de passer à travers de nombreux corps opaques. A l'heure actuelle, les rayons X sont largement utilisés en médecine et dans l'industrie. En 1896, on avait remarqué que les substances

comprenant de l'uranium pouvaient agir sur une plaque photographique dans l'obscurité. Bientôt Marie et Pierre Curie découvrirent que le thorium, tout comme l'uranium, pouvait émettre des rayons invisibles traversant des corps opaques. En 1898, ils firent la découverte de deux nouveaux éléments: le radium et le polonium, possédant la même propriété que l'uranium et le thorium. La propriété de certains éléments d'émettre des rayons invisibles a été appelée *radioactivité*. En étudiant le radium, Marie et Pierre Curie découvrirent que ce métal dans l'obscurité est une source de lumière, qu'il décompose l'eau en oxygène et hydrogène, agit sur une plaque photographique et dégage de la chaleur de façon continue. En se désintégrant le radium émet trois sortes de rayons: alpha, bêta et gamma. A la suite de ce processus continu le radium se transforme en un élément stable, le plomb.

Les rayons cathodiques, les rayons X, la radioactivité et autres phénomènes physiques, chimiques et magnétiques ont permis de tirer la conclusion que l'atome n'est pas une particule indivisible de la matière mais a une structure complexe. Les études ont montré que les atomes comprennent des particules électriquement chargées et des particules neutres.

Selon la conception actuelle de la structure des atomes, ces derniers se composent d'un noyau et d'électrons gravitant autour.

Le noyau est chargé positivement et les électrons négativement.

Généralement, un atome ne manifeste pas de propriétés électriques et reste neutre. Cela ne signifie pas l'absence de l'électricité, mais le fait que la charge positive de l'atome est égale à sa charge négative.

Les atomes des éléments chimiques diffèrent par leur poids (poids atomique), par la valeur de la charge positive du noyau et par le nombre d'électrons qui gravitent autour du noyau. Ainsi, par exemple, dans un atome d'hydrogène, qui est par sa structure l'élément le plus léger et le plus simple, autour du noyau gravite un seul électron (fig. 1), dans un atome de cuivre autour du noyau gravitent 29 électrons, dans un atome d'or 79 électrons, etc. Au nombre d'électrons qui gravitent autour du noyau correspond toujours le numéro d'ordre de l'élément dans le Tableau périodique de Mendéléev. Par exemple, le noyau

de l'atome d'uranium, qui est le 92me élément de ce Tableau, a une charge électrique positive de 92 unités et autour du noyau sur de différentes orbites gravitent 92 électrons.

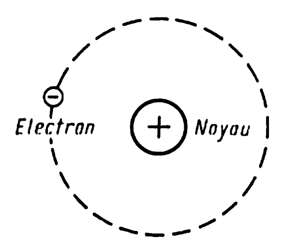


Fig. 1. Structure schématique de l'atome d'hydrogène

Les électrons situés sur des orbites externes sont liés au noyau plus faiblement que ceux qui se trouvent sur des orbites plus rapprochées du noyau. Sous l'action des atomes voisins ou pour d'autres causes les électrons périphériques peuvent abandonner leurs orbites.

Les atomes de tous les métaux possèdent des électrons périphériques instables quittant facilement leurs orbites, ce qui explique la bonne conductibilité électrique des métaux.

Par contre, dans le cas de nombreuses autres substances les électrons sont retenus à proximité du noyau, ce qui les empêchent de quitter librement les atomes. Ces substances sont de mauvais conducteurs d'électricité.

Fig. 2. Expérience de Papalexi et Mandelstam

Les savants russes L. Mandelstam et N. Papalexi ont réalisé en 1912 une expérience intéressante. Ils plaçaient au centre d'un anneau métallique (fig. 2) une petite aiguille aimantée. Dans sa position stable l'aiguille indiquait la direction Nord-Sud. Par une force extérieure on faisait tourner l'anneau sur son axe et puis on le freinait brusquement. A l'instant où l'anneau s'arrêtait, l'aiguille

aimantée changeait de direction et se disposait le long de l'axe de l'anneau mais, au bout d'un certain temps, elle réoccupait sa position initiale. Cette expérience a l'explication suivante. La rotation de l'anneau entraîne le mouvement des électrons libres et des atomes du métal. Le brusque freinage provoque l'arrêt des atomes du métal, tandis que les électrons libres poursuivent leur mouvement par inertie durant un certain temps. Dans l'anneau, il se produit, pour un laps de temps, un courant électrique qui crée un champ magnétique agissant sur l'aiguille aimantée.

Cette expérience prouve que les métaux possèdent des électrons libres.

A l'état ordinaire, les atomes des métaux, les ions (atomes ayant perdu ou reçu des électrons) ainsi que les électrons libres se trouvent en mouvement thermique désordonné. Si une cause quelconque oblige ces électrons à se déplacer dans un sens unique, un tel mouvement ordonné des électrons libres dans des conducteurs métalliques ne sera rien d'autre qu'un courant électrique.

Comme nous l'avons déjà remarqué, les charges positive et négative d'un atome à l'état ordinaire sont égales entre elles. Mais, si les atomes d'un corps cèdent leurs électrons à un autre (par exemple, lors de l'électrisation d'un corps par frottement), la valeur de sa charge positive augmente. Dans ce cas on dit que le corps prend une charge positive.

Si un corps reçoit des électrons, il se charge négativement. Ainsi, lorsqu'on frotte une baguette de verre avec un morceau de cuir, le verre perd des électrons et sa charge devient positive, tandis que le cuir en recevant des électrons provenant du verre prend une charge négative.

En perdant ou en recevant des électrons, un atome d'abord électriquement neutre devient chargé. Un tel atome est appelé *ion*. Le processus de transformation d'un atome neutre en un ion est appelé *ionisation*. Comme exemple d'ionisation on peut indiquer certains métaux (le potassium, le sodium) capables d'émettre des électrons, lorsque leur surface est éclairée. Ce phénomène, appelé *effet photo-électrique*, a été découvert par le physicien russe A. Stolétov et a trouvé une réalisation pratique dans les cellules photoélectriques.

Lorsqu'on chauffe un métal à une température élevée, le mouvement chaotique des atomes devient encore plus

rapide. Les électrons précédemment retenus sur les orbites des atomes sont maintenant émis par la surface du métal chauffé. Ce phénomène appelé *effet thermo-électronique* est utilisé dans les tubes radio, les redresseurs et dans d'autres dispositifs.

Une molécule neutre d'un gaz peut être ionisée soit sous l'action d'une température élevée, des rayons X, des rayons ultraviolets, des rayonnements radioactifs, d'une haute tension, soit lors de sa collision avec un électron rapide (ionisation par choc). Les molécules des substances, placées dans un solvant, affaiblissent leurs liaisons internes et se décomposent en ions positifs et négatifs.

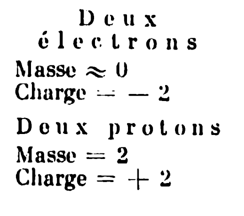
La masse (le poids) d'un électron est très petite : elle est 1 838 fois inférieure à celle du noyau de l'atome d'hydrogène qui est le gaz le plus léger. Pour cette raison, on peut admettre lors de la solution de certains problèmes que le poids d'un atome d'hydrogène est entièrement déterminé par le poids du noyau chargé d'électricité positive et appelé *proton*.

Dans le Tableau de Mendéléev, la deuxième case après l'hydrogène est occupée par l'hélium. Selon la théorie électronique, un atome d'hélium comprend deux protons dans le noyau et deux électrons qui gravitent autour de ce dernier. La charge du noyau d'hélium est deux fois supérieure à celle du noyau d'hydrogène. Pourtant, le poids atomique de l'hélium est égal à 4 et non pas à 2. Si l'on suppose que le noyau d'hélium comprend 4 protons, on obtient que sa charge positive est supérieure à sa charge négative, ce qui est impossible. Le savant soviétique D. Ivanenko supposa que le noyau de chaque atome comprend, en plus des protons de charges positives, encore des particules électriquement neutres de masse égale à celle du proton. Ces particules ont reçu le nom de *neutrons*. Ainsi, le noyau d'un atome d'hélium comporte 2 protons et 2 neutrons. La structure de l'atome d'hélium est schématisée sur la figure 3.

Dans le Tableau de Mendéléev l'atome de fer porte le numéro d'ordre 26 (appelé numéro ou nombre atomique) et son poids atomique est 56. Le noyau de cet atome comprend donc 26 protons et 30 neutrons (56 — 26 = 30). Autour du noyau de l'atome de fer gravitent 26 électrons. La figure 4 schématise la structure de l'atome d'uranium (numéro d'ordre 92, poids atomique 238).

Nous avons essayé de présenter d'une façon simplifiée la structure de l'atome. En réalité, cette structure est beaucoup plus complexe.

Nous avons examiné la différence entre les conducteurs et les isolants du point de vue de la physique classique qui



Deux neutrons
Masse = 2
Charge = 0
Poids atomique=4
Nombre atomique = 2
Charge de l'atome= = 0

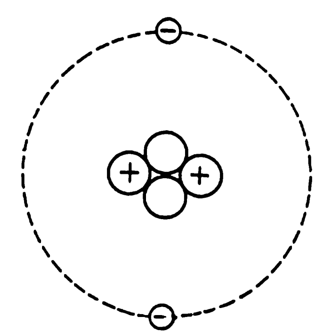


Fig. 3. Structure de l'atome d'hélium

étudie les lois des corps macroscopiques se composant d'un grand nombre d'atomes et d'électrons. Selon la physique classique la différence entre diélectriques et conducteurs consiste en ce que dans un diélectrique tous les électrons sont fortement retenus à proximité du noyau de l'atome. Par contre, dans les conducteurs la liaison entre les électrons et le noyau est plus faible et c'est pourquoi il y a un grand nombre d'électrons libres dont le mouvement ordonné est à l'origine d'un courant électrique. La physique classique admet toutes les valeurs de l'énergie de l'atome (dans les limites d'un certain intervalle d'énergie) et suppose que la variation de l'énergie de l'atome peut avoir lieu de façon continue par des portions infiniment petites. Cependant, l'étude des spectres optiques des éléments et des phénomènes liés à l'interaction des atomes et des électrons démontre la nature continue de l'énergie interne des atomes. La physique atomique et la physique moléculaire prouvent que l'énergie de l'atome ne peut prendre que des quantités bien déterminées caractéristiques de chaque atome. Les quantités possibles de l'éner-

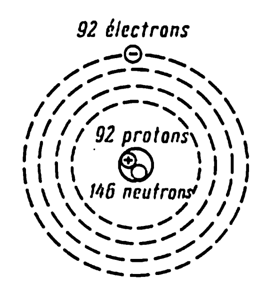


Fig. 4. Structure de l'atome d'uranium. Nombre atomique: 92. Poids atomique: 238. La charge de l'atome est égale à 0

gie interne de l'atome sont appelées *niveaux énergétiques* ou *quantiques*. Les niveaux d'énergie que l'atome ne peut pas posséder sont appelés *niveaux interdits*.

La physique quantique qui étudie les corps microscopiques et les lois de leur mouvement explique d'une autre manière la différence entre un diélectrique et un conducteur. Selon la théorie quantique, les électrons libres existent aussi bien dans les diélectriques que dans les conducteurs. Les diélectriques et les conducteurs diffèrent seulement par le degré de remplissage et la disposition relative des niveaux énergétiques des électrons. Cette affirmation sert de base à la théorie des bandes expliquant la conduction électrique. L'énergie totale des électrons qui gravitent autour du noyau est d'autant plus élevée que le rayon de l'orbite est plus grand. A chaque niveau quantique correspond un état quantique déterminé de l'électron et chacun de ces niveaux ne peut être occupé que par un seul électron à la fois. Si l'on transmet à un électron une quantité déterminée d'énergie, il se peut que celui-ci passe à un état quantique supérieur. Dans ce cas, l'électron ainsi que l'atome dont il fait partie sont dits excités. Le passage d'un électron d'un niveau supérieur à un niveau inférieur se fait par un bond de l'électron d'une orbite à une autre, le rayon de cette dernière étant moindre. Quant à l'énergie d'excitation de l'électron elle est restituée sous forme d'un quantum de lumière de fréquence déterminée, ou est transmise à un autre électron. Le passage d'un électron à un état quantique occupé par un autre électron est impossible. Dans un corps solide comprenant une multitude d'atomes, les niveaux énergétiques de différents atomes se déplacent et, en se groupant, forment des bandes énergétiques.

On distingue la bande de valence, où se trouvent les charges électriques d'un atome non excité et la bande de conduction ou bande d'excitation, où peuvent pénétrer les électrons d'un atome excité. Entre ces deux bandes se trouve la bande interdite ou bande des niveaux interdits. La largeur de la bande interdite détermine la conductibilité électrique de la substance. On ne doit pas comprendre le terme « bande » comme un certain espace ou une bande aux dimensions géométriques déterminées. Lorsque nous parlons d'une bande, nous avons en vue la quantité d'énergie que possèdent les électrons qui se trouvent dans cette bande. La structure énergétique d'un corps peut être représentée

par un graphique. La figure 5 montre la disposition des bandes énergétiques d'un corps solide. Dans les conducteurs (métaux) les bandes de valence et de conduction se recouvrent et il n'y a point de bande interdite entre elles (fig. 5,*a*). Pour cette raison, les électrons passent facilement d'une bande à l'autre en assurant une conductibilité électrique élevée des métaux.

Dans les semi-conducteurs, la largeur de la bande interdite est petite (fig. 5,*b*). Sous l'effet de causes extérieures

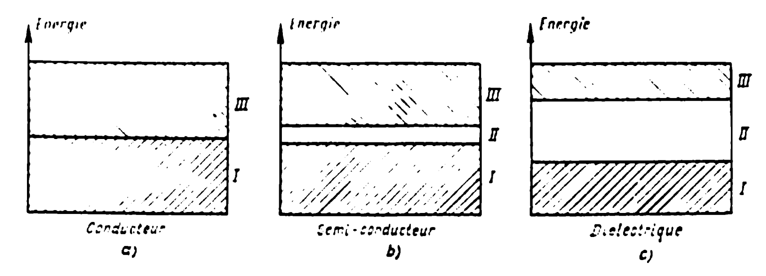


Fig. 5. Disposition des bandes énergétiques d'un corps solide: *I* — bande de valence; *II* — bande interdite; *III* — bande de conduction

(chaleur, lumière, champ électrique, etc.) les électrons peuvent franchir la bande interdite et passer de la bande de valence à la bande de conduction. Dans les isolants, la bande interdite est très large (fig. 5, *c*) et le passage des électrons de la bande de valence à la bande de conduction est assez difficile. La conductibilité d'un isolant est pratiquement nulle.

En plus des particules mentionnées (proton, neutron et électron), l'atome contient encore d'autres particules. Par suite des transformations ayant lieu à l'intérieur de son noyau, un atome dans certaines conditions peut émettre une particule à charge positive. Cette particule dont la masse est égale à celle d'un électron est appelée *positon* (électron positif). Les positons ont été découverts dans les rayons cosmiques.

La liaison entre protons et neutrons à l'intérieur du noyau est assurée par des forces nucléaires et non pas par des forces électriques. Pour expliquer l'origine des forces nucléaires on a supposé l'existence de particules plus lourdes que les électrons mais plus légères que les protons. Ces particules ont été découvertes dans les rayons cosmiques

et sont appelées *mésons*. Leur charge peut être soit positive, soit négative.

La désintégration d'une substance radioactive est accompagnée par l'émission de différentes particules, ainsi sont émises des particules alpha (noyaux de l'atome d'hélium à charge positive) et des particules bêta (électrons négatifs). La désintégration bêta d'un noyau s'accompagne aussi de l'émission de particules neutres plus légères que le neutron: les *neutrinos*. En octobre 1955, l'étude de la désintégration des atomes amena à la découverte d'une nouvelle particule élémentaire appelée *antiproton* ou proton négatif.

Ainsi, on obtient toute une série de particules élémentaires: des protons et des neutrons, des mésons positifs et négatifs, des électrons, des positons, des neutrinos et des antiprotons.

Les phénomènes électriques sont connus depuis l'Antiquité. Il y a 2 500 ans, les Grecs en frottant l'ambre avec un tissu de laine remarquèrent que cette substance résineuse devenait capable d'attirer les corps légers. Cette force d'attraction de l'ambre frotté a reçu le nom de force électrique (« êlektron » en grec signifiant l'ambre).

En Russie, l'étude des phénomènes électriques fut initiée par Mikhaïl Lomonossov (1711-1765) appelé à juste titre le père de la science russe.

Lorsqu'on frotte le verre, la résine, l'ébonite, la cire et d'autres corps analogues avec une étoffe de laine, ces corps deviennent capables d'attirer les corps légers ou, autrement dit, s'électrisent. Un corps électrisé peut transmettre une partie de sa charge électrique à un autre corps (non électrisé), si on les met en contact ou si on les réunit par un fil métallique. Mais, si l'on réunit un corps électrisé avec un corps non électrisé à l'aide d'une baguette de verre, de porcelaine ou d'ébonite, il n'y aura pas de transfert de la charge du premier corps au second. Les corps capables de bien transmettre les charges électriques sont appelés *conducteurs électriques*. Ce sont tous les métaux, le charbon, les solutions de sels, d'acides et de bases.

Les corps qui sont de mauvais conducteurs d'électricité sont appelés *isolants* ou *diélectriques*. Ce sont tous les corps gazeux à l'état ordinaire, de nombreux liquides et presque tous les corps solides, excepté les métaux et le charbon. Citons parmi les isolants: l'ébonite, le verre, le caoutchouc,

le mica, la soie, la paraffine, le marbre, l'huile pour transformateurs, etc.

On a remarqué que les corps électrisés s'attirent ou se repoussent. Ainsi, deux corps chargés à l'aide d'une baguette de verre que l'on a frottée avec un morceau de cuir se repoussent. On obtient le même résultat si l'on charge les deux corps à l'aide d'une baguette d'ébonite frottée auparavant avec un morceau d'étoffe de laine. Mais si l'on charge un corps à l'aide d'une baguette de verre et un autre avec une baguette d'ébonite, les deux corps s'attirent. De cette façon il a été démontré que par suite de l'électrisation de différents corps on obtient deux sortes d'électricité. Par convention, l'une d'elles a été appelée électricité positive et l'autre électricité négative. Ainsi, les corps chargés d'électricité de nature identique se repoussent et ceux qui sont chargés d'électricité de nature différente s'attirent.

Pour résumer, donnons la définition de l'électricité. *On appelle électricité la propriété de la matière* (forme spéciale de mouvement de la matière) *ayant une double nature et se manifestant dans les particules élémentaires de la matière* (électricité positive dans les protons, les positons ou les mésons, électricité négative dans les électrons, les antiprotons et les mésons).

§ 3. SYSTÈMES DE MESURE DES GRANDEURS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES

Lors de l'étude de l'électrotechnique nous devrons mesurer les différentes grandeurs électriques et magnétiques. Pour la mesure de ces grandeurs il existe plusieurs systèmes d'unités, par exemple le système électrostatique absolu, le système électromagnétique absolu, le système international pratique, le système pratique absolu, etc.

Dans les systèmes électrostatique absolu ESCGS et électromagnétique absolu EMCGS utilisés pour la mesure des grandeurs électriques et magnétiques, respectivement, les unités de base sont: le centimètre (cm), le gramme (g) et la seconde (s).

Dans le système centimètre-gramme-seconde (CGS) l'unité de vitesse est de 1 $\frac{sm}{s}$; l'unité d'accélération est égale à 1 $\frac{sm}{s^2}$; l'unité de force, la dyne, est égale à 1 $\frac{sm \cdot g}{s^2}$

$\left(1 \text{ dyne} = 1 \text{ g}\cdot 1 \frac{\text{sm}}{\text{s}^2}\right)$; l'unité de travail, l'erg, est égale à $1 \frac{\text{sm}^2\cdot\text{g}}{\text{s}^2}$ (1 erg = 1 dyne·1 cm).

Les grandeurs électriques et magnétiques exprimées dans ces systèmes sont peu commodes pour les études en laboratoire et l'emploi pratique. Pour cette raison, il a été mis au point un système international pratique d'unités. Dans ce système, l'unité de résistance électrique, l'ohm, et l'unité d'intensité du courant électrique, l'ampère, sont les principales unités définies comme suit. L'ohm international est la résistance, à la température 0 °C, d'une colonne de mercure ayant une longueur de 106,3 cm et une masse de 14,4521 g, ce qui correspond à une section uniforme de 1 mm². L'ampère international est défini d'après l'action chimique du courant : c'est l'intensité d'un courant constant lequel, traversant une solution aqueuse de nitrate d'argent, dépose ce métal à raison de 1,118 milligramme par seconde.

Toutes les autres unités des grandeurs électriques ont été définies à partir de ces deux unités. A l'heure actuelle, on utilise en U.R.S.S. le système rationalisé pratique d'unités absolues MKSA qui convient à la mesure des unités électriques, magnétiques et mécaniques.

Les unités de base dans ce système sont : l'unité de longueur — le mètre (m); l'unité de masse — le kilogramme (kg) ; l'unité de temps — la seconde (s) et l'unité d'intensité du courant — l'ampère absolu (A).

Dans le système MKSA, l'unité de vitesse $v = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; l'unité d'accélération $a = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$; l'unité de force, le newton, $1 \text{ N} = 1 \text{ kg}\cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, est la force qui imprime à une masse de 1 kg une accélération de $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. L'unité de travail est le joule, $1 \text{ J} = 1 \text{ N}\cdot 1 \text{ m}$.

Dans ce système, l'unité d'intensité du courant, l'ampère absolu, est déterminée à l'aide d'une balance électrodynamique d'après la force d'interaction des bobines mobiles et des bobines fixes. L'ohm absolu est une résistance qui, parcourue par un courant d'un ampère absolu, dégage une énergie d'un joule ou de 0,239 calorie de chaleur par seconde. Les autres unités électriques sont définies par l'intermédiaire de l'ampère et de l'ohm absolus. Le système

MKSA est appelé absolu car trois de ses unités principales, le mètre, le kilogramme de masse et l'ampère, sont des multiples ou des sous-multiples des unités correspondantes du système EMCGS.

En particulier, l'ampère absolu vaut un dixième de l'unité électromagnétique absolue de courant. Par la suite, en parlant des unités des grandeurs électromagnétiques dans le système MKSA, nous omettrons le mot « absolu ».

Le système MKSA est appelé « pratique », car on l'utilise dans la pratique des mesures électriques.

Il est encore appelé système rationalisé car son emploi est combiné avec la notation rationalisée des principales lois d'électrotechnique, c'est-à-dire que le coefficient 4π est exclu de la majorité des équations et n'apparaît que dans un nombre restreint d'équations. Ainsi, le coefficient 4π est exclu de la loi du courant total et de toutes les formules obtenues à partir de cette loi, mais apparaît dans la loi de Coulomb et dans toutes les formules qui en découlent (voir plus loin).

Examinons les relations entre certaines unités de différents systèmes:

$$1\ \text{N} = 1\ \text{kg}\cdot 1\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \frac{1\,000\ \text{g}\cdot 100\ \text{cm}}{1\ \text{s}^2} = 10^5\ \text{dynes}$$

ou

$$1\ \text{N} = \frac{10^5}{981\,000}\ \text{kgf} = 0{,}102\ \text{kgf}.$$

$$1\ \text{J} = 1\ \text{N}\cdot 1\ \text{m} = 10^5\ \text{dynes}\cdot 100\ \text{cm} = 10^7\ \text{ergs}.$$

Puisque $1\ \text{kgfm} = \frac{1\,000}{427}$ calories, on a

$$1\ \text{J} = 1\ \text{N}\cdot 1\ \text{m} = 0{,}102\ \text{kgf}\cdot 1\ \text{m} = 0{,}102\cdot\frac{1\,000}{427} = 0{,}239\ \text{calorie}.$$

Par la suite, dans cet ouvrage on utilisera le système MKSA, en supposant que les systèmes ESCGS et EMCGS sont connus aux lecteurs du cours de physique générale.

§ 4. LOI DE COULOMB

Si les dimensions de deux corps électrisés sont petites par rapport à la distance qui les sépare, ils agissent l'un sur l'autre avec une force qui est proportionnelle à la valeur de leur charge ou à la quantité d'électricité qu'ils contien-

nent et inversement proportionnelle au carré de la distance entre ces corps. Cette relation a été établie expérimentalement par le physicien français Coulomb. Des études postérieures ont montré que les forces réciproques exercées par les charges dépendent aussi des propriétés du milieu dans lequel elles se trouvent.

Les expériences ont amené Coulomb à établir la loi suivante: deux charges ponctuelles q_1 et q_2 se trouvant dans un milieu homogène à permittivité relative ε, à une distance r, agissent l'une sur l'autre avec une force F qui est proportionnelle au produit de ces charges et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Ces charges sont appelées ponctuelles du point de vue physique si leurs dimensions propres sont petites par rapport à la distance qui les sépare. Dans le système rationalisé MKSA la formule de Coulomb s'écrit sous la forme:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0 r^2},$$

où ε_0 est la permittivité du vide; dans le système MKSA

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{\text{farad}}{\text{mètre}}$$

et ε est la permittivité relative ou la constante diélectrique du milieu. Elle montre le rapport dans lequel la force d'attraction ou de répulsion qui s'exerce entre deux charges placées dans ce milieu est plus petite que dans le vide, toutes les autres conditions étant les mêmes. La permittivité relative est une grandeur sans dimensions.

La quantité d'électricité ou la charge électrique est mesurée dans le système MKSA en coulombs (C). Un coulomb est égal à $3 \cdot 10^9$ unités absolues de charge (ESCGS). La formule aux dimensions de la permittivité dans le vide en $\frac{\text{F}}{\text{m}}$ peut être obtenue à partir de la formule de Coulomb

$$[\varepsilon_0] = \left[\frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon F r^2}\right] = \frac{\text{C} \cdot \text{C}}{\text{N} \cdot \text{m}^2}.$$

Etant donné que $\text{N} = \frac{\text{J}}{\text{m}}$ et $\text{J} = \text{V} \cdot \text{C}$, on a

$$[\varepsilon_0] = \frac{\text{C} \cdot \text{C} \cdot \text{m}}{\text{V} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{C}}{\text{V} \cdot \text{m}}.$$

Nous verrons plus loin que le rapport $\frac{C}{V}$ est un farad (F), l'unité de capacité électrique. On a donc définitivement

$$[\varepsilon_0] = \frac{F}{m}.$$

La force d'interaction des charges qui se trouvent dans un milieu autre que le vide est ε fois plus faible. Nous donnons ci-dessous les valeurs moyennes de la constante diélectrique de certains matériaux utilisés dans l'électrotechnique.

Essence	2,3
Papier imprégné de paraffine	3,2
Papier imprégné d'huile	3
Eau distillée	81
Air	1,0006
Pétrole lampant	2
Marbre	8,4
Paraffine	2 à 2,4
Caoutchouc	2,6 à 3,5
Mica	6 à 8
Verre	5 à 10
Huile pour transformateurs	2,2
Ebonite	3,1

Exemple. Calculer la force d'interaction de deux charges se trouvant dans le vide à une distance de 5 cm l'une de l'autre. Les valeurs des charges sont respectivement de $2\cdot10^{-8}$ C et $3\cdot10^{-5}$ C.

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\cdot\varepsilon\cdot\varepsilon_0\cdot r^2} = \frac{2\cdot10^{-8}\cdot3\cdot10^{-5}\cdot4\pi\cdot9\cdot10^{9}}{4\pi\cdot1\cdot0{,}05^2} = 2{,}16 \text{ N}.$$

Etant donné que 1 N = 102 gf, on a $F = 2{,}16\cdot102 = 220$ gf.

Les mêmes charges placées dans le pétrole lampant et séparées par la même distance agiront l'une sur l'autre avec une force:

$$F = \frac{2\cdot10^{-8}\cdot3\cdot10^{-5}\cdot4\pi\cdot9\cdot10^{9}}{4\pi\cdot2\cdot0{,}05^2} = 1{,}08 \text{ N} = 110 \text{ gf},$$

c'est-à-dire avec une force 2 fois plus petite.

§ 5. CHAMP ÉLECTRIQUE

Dans les sciences naturelles le champ électromagnétique est défini comme une forme particulière de la matière (autrement dit, comme une certaine réalité physique) possédant

plusieurs propriétés: le champ électromagnétique se répartit d'une manière continue dans l'espace, il se propage dans le vide à la vitesse de la lumière (300 000 km/s) et est capable d'agir sur les particules chargées et les courants électriques; pendant cette action l'énergie du champ électromagnétique est transformée en autres genres d'énergie (thermique, mécanique, etc.). Une particule chargée possède un champ électromagnétique, cependant le champ peut aussi exister séparément de la particule. Indiquons à titre d'exemple une particule (quantum) de lumière — le photon et le champ électromagnétique rayonné par une antenne.

Soit un corps conducteur immobile chargé. A l'intérieur du corps les particules élémentaires négatives faisant partie des atomes et des molécules de sa substance et qui forment sa charge totale se trouvent en mouvement continu. Cependant, même à une très faible distance de la surface du corps, les champs magnétiques respectivement créés par les particules positives et négatives se compensent mutuellement de sorte qu'autour du corps conducteur immobile et chargé le champ magnétique résultant est pratiquement nul. Au contraire, près d'un aimant permanent immobile on découvre seulement la présence du champ magnétique, le champ électrique étant absent. Cela nous permet d'étudier séparément le champ électrique et le champ magnétique.

Notons que la théorie du champ magnétique a été exposée par le savant anglais Maxwell dans son ouvrage « Traité d'électricité et de magnétisme » paru en 1873.

En passant à l'étude du champ électrique nous le considérerons comme l'une des deux formes du champ électromagnétique. Le champ électrique est créé soit par des charges électriques, soit par la variation du champ magnétique et se caractérise par son action sur les particules électriquement chargées.

L'intensité d'un champ électrique est évaluée d'après les forces mécaniques avec lesquelles il agit sur les corps chargés. Etant donné que d'après la loi de Coulomb la force d'interaction des charges dans un milieu donné dépend de la valeur de ces charges et de la distance entre elles, on adopte comme mesure quantitative du champ la force mécanique avec laquelle le champ agit dans un point donné de l'espace sur une charge unitaire positive placée en ce point. Cette grandeur est appelée *intensité du champ électrique* et est désignée par la lettre E.

Par définition, l'intensité du champ est:

$$E = \frac{F}{q}.$$

En égalant à l'unité l'une des charges dans la formule de Coulomb, on obtient l'expression pour l'intensité du champ E en un point quelconque de l'espace situé à la distance r d'une charge ponctuelle:

$$E = \frac{q}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2}$$

et, pour le vide où la permittivité relative est égale à l'unité, on a

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

La formule aux dimensions pour l'intensité du champ est:

$$[E] = \left[\frac{F}{q}\right] = \frac{\text{N}}{\text{C}} = \frac{\text{J}}{\text{m}\cdot\text{C}} = \frac{\text{C}\cdot\text{V}}{\text{m}\cdot\text{C}} = \frac{\text{V}}{\text{m}},$$

c'est-à-dire que dans le système MKSA l'intensité du champ électrique est mesurée en volts par mètre.

Un champ électrique dont l'intensité par sa grandeur et sa direction est la même aux différents points de l'espace est appelé champ *homogène*.

Le nombre total de lignes de force électrique à travers une surface placée dans un champ électrique est appelé flux du vecteur d'intensité à travers cette surface et est désigné par la lettre Φ. Une surface S, placée perpendiculairement au vecteur d'intensité dans un champ électrique homogène d'intensité E, sera traversée par un flux de vecteur d'intensité:

$$\Phi = ES.$$

Les formules aux dimensions du flux de vecteur d'intensité est:

$$[\Phi] = [ES] = \frac{\text{V}}{\text{m}} \cdot \text{m}^2 = \text{V} \cdot \text{m}.$$

Si la surface en question est située sous un angle α par rapport au vecteur d'intensité, le flux de vecteur d'intensité est:

$$\Phi = ES\cos\alpha = E_t S.$$

Dans un champ non homogène, le flux de vecteur d'intensité passant par la surface est déterminé de façon suivante. On divise toute la surface en petites aires ΔS, en admettant que chaque élément d'aire se trouve dans un champ uniforme. Alors, le flux de vecteur d'intensité passant par toute la surface

$$\Phi = \Sigma E_i \Delta S.$$

Plaçons une charge q au centre d'une sphère de rayon R. L'intensité du champ à la surface de la sphère :

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R^2}.$$

Le flux de vecteur d'intensité passant par toute la surface de la sphère :

$$\Phi = \Sigma E_i \Delta S.$$

Les lignes de force radiales à partir de la charge seront perpendiculaires à la surface de la sphère dans tous les points. Puisque l'aire de la surface de la sphère $S = 4\pi R^2$, on a :

$$\Phi = \Sigma E_i \Delta S = E \Sigma \Delta S = E 4\pi R^2.$$

En introduisant dans la formule la valeur de E on obtient :

$$\Phi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R^2} \cdot 4\pi R^2 = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}.$$

La relation que nous venons d'obtenir est appelée théorème de Gauss.

Notons qu'une surface fermée à l'intérieur de laquelle se trouve une charge électrique peut avoir une forme quelconque. De cette façon, l'expression pour le flux de vecteur d'intensité du champ que nous avons déduite pour la surface d'une sphère peut être appliquée à toute autre surface fermée.

En étudiant les différents phénomènes physiques on a affaire aux grandeurs scalaires et aux grandeurs vectorielles.

Une grandeur scalaire est caractérisée seulement par sa valeur quantitative. On ne peut pas lui attribuer une direction quelconque. La température, la quantité de substance, l'énergie, la puissance, etc., sont des grandeurs scalaires.

Une grandeur vectorielle est caractérisée, en plus de sa valeur quantitative, par sa direction. Elle est représentée

sur le dessin par un segment rectiligne dont la longueur indique sa valeur numérique suivant l'échelle choisie et la flèche indique son sens.

La force, la vitesse, l'accélération, etc., sont des grandeurs vectorielles. L'intensité de champ électrique est aussi une grandeur vectorielle.

La figure 6,*a* représente graphiquement l'intensité de champ électrique aux points A et B respectivement distants

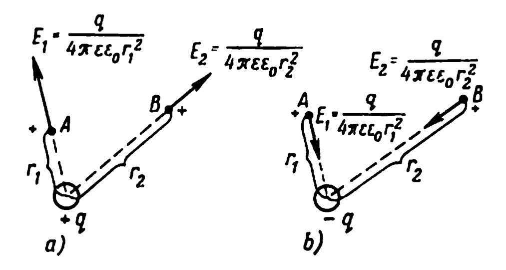


Fig. 6. Intensité de champ électrique aux différents points de l'espace

de r_1 et r_2 d'une charge positive q placée dans un milieu quelconque. Comme nous le montre la figure, l'intensité de champ d'une charge positive suffisamment petite (ponctuelle) est dirigée à partir de la charge suivant le rayon. L'intensité de champ aux points A et B se trouvant à différentes distances de la charge q n'est pas la même, elle diminue à mesure qu'on s'éloigne de la charge q en raison inverse du carré de la distance. La figure 6,*b* montre l'intensité de champ électrique aux points A et B se trouvant respectivement aux distances r_1 et r_2 d'une charge négative q placée dans un milieu quelconque. L'intensité de champ dans ce cas est dirigée suivant le rayon vers la charge.

Examinons maintenant quelle est l'intensité de champ créé par deux charges électriques $+q_1$ et $-q_2$ en un point A (fig. 7). Si on enlève la charge $-q_2$, l'intensité de champ au point A créée par la charge $+q_1$ sera E_1. Inversement, si on enlève la charge $+q_1$, l'intensité de champ au point A créée par la charge $-q_2$ sera E_2. Puisque les intensités E_1 et E_2 sont dirigées sous un certain angle l'une par rapport à l'autre, pour obtenir l'intensité de champ résultante E due à l'action commune des charges $+q_1$ et $-q_2$ il faut prendre la somme des intensités E_1 et E_2 d'après la règle du parallélogramme. En procédant de la même façon, on

peut calculer et tracer l'intensité de champ dans un point quelconque du milieu pour n'importe quel nombre de charges électriques.

Une charge électrique positive introduite dans le champ d'un corps sphérique à charge positive et éloigné des autres charges sera repoussée suivant une droite qui est le prolongement du rayon de la sphère chargée. Ainsi, en introduisant une charge électrique en différents points du champ d'une sphère chargée et en notant les

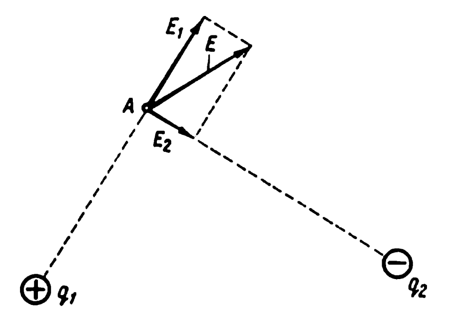


Fig. 7. Détermination de l'intensité de champ produit par deux charges ponctuelles

trajectoires de mouvement de la charge sous l'action des forces électriques du champ, on obtient une série de droites radiales qui divergent dans toutes les directions à partir de la sphère. Ces lignes imaginaires le long desquelles tend à se déplacer une charge positive privée d'inertie, placée dans un champ électrique, sont appelées *lignes de force électrique*. Il est évident qu'on peut tracer dans un champ électrique n'importe quel nombre de lignes de force. A l'aide de lignes de force, on peut représenter graphiquement non seulement le sens, mais aussi la valeur de l'intensité de champ électrique en un point donné. Si l'on convient de tracer les lignes de force de telle sorte que par un centimètre carré de la surface perpendiculaire à ces lignes en un point donné du champ passe un nombre de lignes égal à l'intensité du champ en ce point, cette méthode graphique nous permettra de juger de la valeur de l'intensité de champ au point donné d'après la densité des lignes de force. La fig. 8,*a* représente le champ électrique d'une sphère à charge

positive éloignée de toute autre charge et la fig. 8,*b* représente le champ d'une sphère à charge négative.

Examinons à présent un champ électrique plus complexe dû à deux charges ponctuelles de signes contraires (fig. 9,*a*). Construisons pour un point A quelconque le vecteur d'intensité de champ en tenant compte de l'action simultanée des deux corps chargés. Désignons l'extrémité du vecteur d'intensité E_1 par le point B et construisons le vecteur

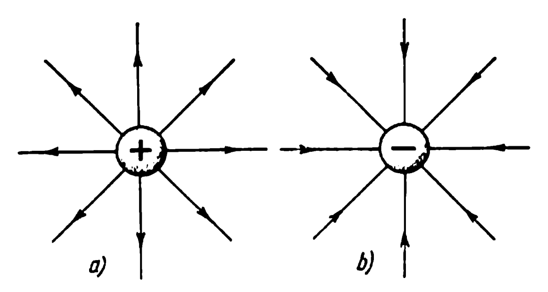


Fig. 8. Lignes de force d'une sphère chargée

d'intensité E_2 en ce point. A l'extrémité du vecteur E_2 (point C), construisons le vecteur d'intensité E_3, etc. La ligne brisée $ABCDE$ montre la direction du champ électrique aux points A, B, C, D et E. Pour un plus grand nombre de points (fig. 9,*b*) la ligne brisée qui réunit ces points indiquera d'une façon plus précise la direction du champ.

Une représentation précise de la direction du champ peut être fournie par une ligne comportant un nombre infini de points. La ligne brisée se transforme alors en une courbe douce (fig. 9,*c*).

La direction du champ en un point donné coïncide avec celle du vecteur d'intensité en ce point et peut être indiquée par la direction de la tangente à la ligne de force en ce même point. Sur la figure 10,*a* on a donné l'image du champ électrique des deux charges ponctuelles de signes contraires et à la figure 10,*b* l'image du champ électrique des deux charges de même signe.

On appelle champ électrique *homogène* un champ dont les vecteurs d'intensité sont les mêmes en grandeur et sont parallèles. Un champ électrique homogène est représenté par des lignes parallèles équidistantes.

Puisque les charges de même signe se repoussent mutuellement, toute la charge électrique d'un conducteur est accumulée sur sa surface externe. La quantité d'électricité

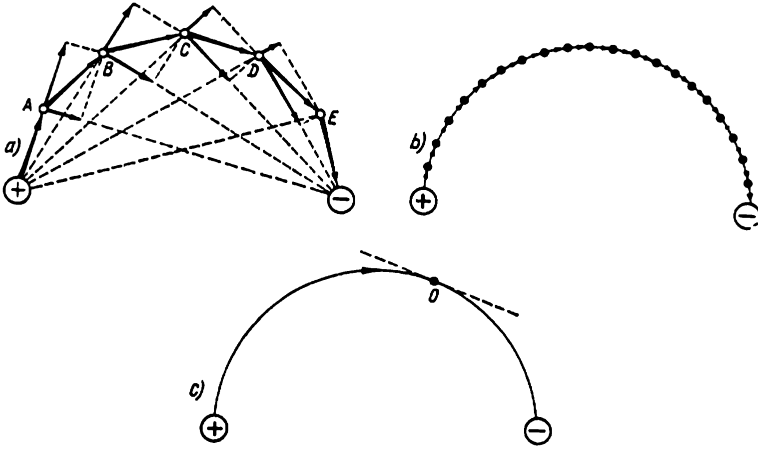


Fig. 9. Direction du champ aux différents points de l'espace

par unité de surface d'un corps chargé est appelée *densité superficielle* d'une charge électrique. Cette grandeur dépend de la quantité d'électricité qui se trouve sur le corps ainsi que

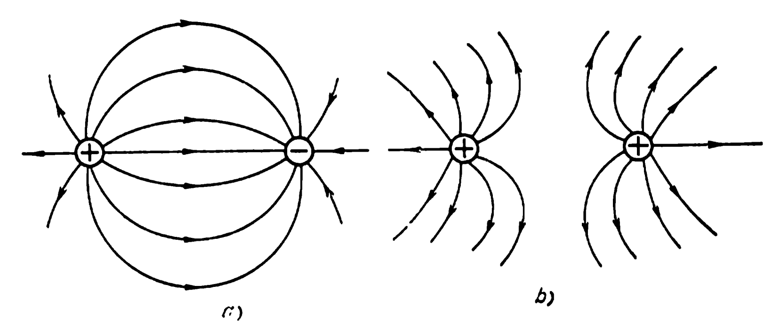


Fig. 10. Champs électriques de deux charges égales de signes contraires et de même signe

de la forme de la surface du conducteur. Sur des corps de forme régulière (sphère, conducteurs à section circulaire très longs), la charge électrique se répartit uniformément.

Pour cette raison, la densité électrique superficielle sera la même en tous les points de la surface de ces corps.

Sur des conducteurs de forme irrégulière, la charge se répartit non uniformément. La densité électrique est plus grande sur les saillies et moindre dans les creux. Elle est particulièrement grande aux pointes. L'explication de ce phénomène est donnée par la figure 11 : à gauche, pour

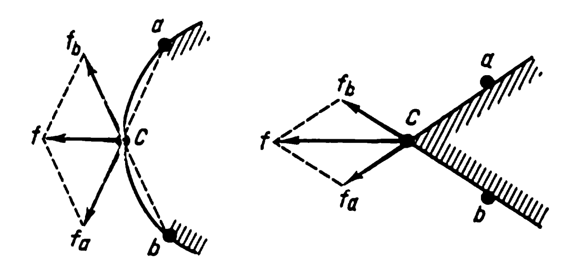


Fig. 11. Interaction des parties d'une charge

un corps de forme régulière (sphère), à droite pour un corps de forme irrégulière. Les parties a et b de la charge agissent sur la partie C. La somme géométrique des forces d'interaction f_a et f_b donne une force résultante f. Les forces f_a et f_b étant les mêmes dans les deux exemples, la force f sera supérieure dans le second cas, car l'angle entre les directions des forces f_a et f_b est plus petit. Pour cette raison, les parties de la charge se trouvant sur la pointe d'un corps de forme irrégulière seront soumises à des forces de répulsion cherchant à les éloigner de la surface de ce corps. Il est possible dans ce cas que la charge accumulée sur la pointe du conducteur peut y créer un champ électrique puissant sous l'influence duquel l'air (ou tout autre isolant) sera ionisé et deviendra donc un conducteur. Dans ce cas, on aura ce qu'on appelle un écoulement de la charge électrique à partir de la pointe. Afin de prévenir pareil écoulement, lorsqu'il s'agit de haute tension, on prend garde à ne pas avoir sur les conducteurs d'angles aigus, de pointes et de bossages.

La formule aux dimensions pour la densité électrique superficielle dans le système MKSA est donnée en coulombs par mètre carré.

§ 6. CONDUCTEUR DANS UN CHAMP ÉLECTRIQUE

Si l'on introduit un conducteur isolé non chargé dans un champ électrique, il se produit une séparation des charges électriques sous l'effet des forces électriques du champ. La figure 12 montre une sphère métallique A chargée positivement et un conducteur B placé dans le champ de cette sphère. Les électrons libres du conducteur se mettent en mouvement dans un sens opposé à celui du champ électrique.

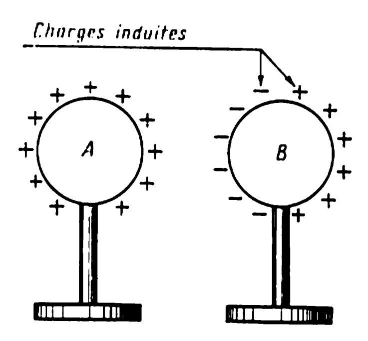


Fig. 12. Induction électrostatique

Il en résulte que les électrons se trouvent en excédent du côté du conducteur dirigé vers la sphère chargée, ce qui détermine la charge négative de ce côté, tandis qu'à l'autre côté il y aura défaut d'électrons, ce qui détermine la charge positive de cette partie du conducteur.

La séparation des charges sur un conducteur qui se produit sous l'influence d'un corps chargé est appelée *électrisation par influence* ou *induction électrostatique* et les charges qui se manifestent sur le conducteur sont appelées *charges induites.* Au fur et à mesure qu'on approche le conducteur B de la sphère chargée A, le nombre de charges induites sur le conducteur augmente. Aussitôt que le conducteur B est introduit dans le champ électrique de la sphère chargée A, ce dernier change. Les lignes de force électrique de la sphère A qui initialement divergeaient d'une manière uniforme suivant des rayons seront maintenant incurvées vers le conducteur. Les origines et les extrémités des lignes de force électrique étant formées par les charges se trouvant à la surface des conducteurs, une ligne de force qui commence à la surface à charge positive se termine sur

la surface à charge négative. A l'intérieur d'un conducteur, un champ électrique ne peut pas exister. Dans le cas contraire, il existerait, entre les différents points du conducteur, une différence de potentiel et un mouvement de charges (un courant de conduction) jusqu'au moment où par suite de la répartition des charges les potentiels de tous les points du conducteur seraient égaux.

On utilise ce phénomène lorsqu'on veut protéger un conducteur contre l'influence d'un champ électrique extérieur. On entoure alors le conducteur d'un autre conducteur ayant la forme d'une surface métallique pleine ou celle d'une grille métallique à mailles très serrées. Les charges induites sur un conducteur sous l'influence d'un corps chargé peuvent être séparées l'une de l'autre, si l'on coupe ce conducteur en deux parties.

Un conducteur introduit dans le champ électrique dû à un corps métallique chargé influe à son tour sur la répartition de la charge sur ce corps. Cette influence se manifeste par l'accumulation de la plus grande partie de la charge du corps électrisé sur le côté dirigé vers le conducteur.

Si le conducteur est retiré du champ électrique, les charges induites disparaissent et sa charge redevient nulle.

§ 7. DIÉLECTRIQUE DANS UN CHAMP ÉLECTRIQUE

Comme nous l'avons déjà dit, un diélectrique diffère d'un conducteur par l'absence d'électrons libres (plus précisément par un nombre relativement petit d'électrons libres). Les électrons des atomes d'un diélectrique sont fortement liés au noyau de l'atome.

Tout comme un conducteur, un diélectrique introduit dans un champ électrique est électrisé par influence. Mais il existe une différence substantielle entre l'électrisation d'un conducteur et celle d'un diélectrique. Si dans le conducteur les électrons libres se déplacent, sous l'action des forces du champ électrique, dans tout le volume du conducteur, dans un diélectrique, par contre, le déplacement libre des charges électriques est impossible. Mais dans les limites d'une molécule du diélectrique il se produit un faible déplacement de la charge positive suivant la direction du champ électrique et de la charge négative en sens inverse. Par suite de l'influence du corps chargé des charges électriques apparaissent à la surface du diélectrique. Ce phénomène est appelé *polarisation diélectrique*.

On distingue deux classes de diélectriques. Dans les diélectriques de la première classe une molécule à l'état neutre a ses charges positive et négative tellement rapprochées l'une de l'autre que leurs actions s'annulent. Sous l'effet du champ électrique les charges positives et négatives dans les limites de la molécule se déplacent un peu l'une par rapport à l'autre et forment ce qu'on appelle un *dipôle*.

Dans les diélectriques de la seconde classe, les molécules forment un dipôle même en l'absence de champ électrique. De tels diélectriques sont appelés diélectriques *polaires*. Ce sont l'eau, l'ammoniac, l'éther, l'acéton, etc.Dans les diélectriques polaires, en l'absence de champ électrique, les dipôles sont disposés dans l'espace d'une façon chaotique et, pour cette raison, le champ électrique résultant autour de tels diélectriques est nul. Sous l'action d'un champ électrique extérieur les molécules (et, par conséquent, les dipôles) tendent à tourner de façon que leurs axes coïncident avec la direction du champ extérieur.

A la différence des charges induites sur un conducteur, les charges de polarisation d'un diélectrique ne peuvent pas être séparées l'une de l'autre. Avec la disparition du champ électrique la polarisation du diélectrique disparaît également. Ainsi, la polarisation est un déplacement élastique des charges électriques dans la substance du diélectrique. Pour une certaine valeur de l'intensité du champ électrique, le déplacement des charges atteint la valeur limite après quoi a lieu la destruction, le claquage du diélectrique. Le diélectrique perd alors ses propriétés isolantes et devient conducteur. La nécessité de choisir correctement la valeur de l'intensité du champ électrique dans un diélectrique a conduit à la création de la théorie de la rigidité diélectrique qui est d'une grande importance pour la technique moderne des hautes tensions.

§ 8. POTENTIEL ET DIFFÉRENCE DE POTENTIEL

Soit un champ électrique infini et homogène. En un point M se trouve une charge $+Q$. La charge $+Q$ laissée à elle-même se déplacera sous l'action des forces électriques dans la direction du champ à une distance infiniment grande. L'énergie nécessaire pour le déplacement de la charge est fournie par le champ électrique lui-même. On appelle

potentiel d'un point donné du champ le travail que le champ dépense en déplaçant une unité de charge positive à partir de ce point jusqu'à un point quelconque infiniment éloigné. Pour faire revenir la charge $+Q$ d'un point se trouvant infiniment loin au point M, les forces externes doivent faire un travail nécessaire pour vaincre les forces électriques du champ. Le potentiel φ du point M est alors:

$$\varphi = \frac{A}{q} = \frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ coulomb}} = 1 \text{ volt.}$$

Vu que 1 joule $= 10^7$ ergs et 1 coulomb $= 3 \cdot 10^9$ unités absolues de charge, on a

$$\varphi_{\text{prat}} = \frac{10^7}{3 \cdot 10^9} = \frac{1}{300} \text{ d'unité absolue de potentiel.}$$

Ainsi, une unité électrostatique absolue de potentiel est 300 fois plus grande que l'unité du système pratique: le volt.

Si une charge d'un coulomb se déplace d'un point infiniment éloigné en un point de champ dont le potentiel est égal à un volt, le travail fourni est égal à 1 joule. Si une charge de 15 coulombs venant d'un point infiniment éloigné atteint un point quelconque du champ dont le potentiel est de 10 volts, le champ accomplit un travail de $10 \cdot 15 = 150$ joules.

Cette relation s'exprime par la formule:

$$A = q\varphi \text{ joules.}$$

Pour déplacer une charge de 10 coulombs du point A à potentiel de 20 volts jusqu'au point B à potentiel de 15 volts, le champ doit accomplir un travail:

$$A = 10 \cdot (20 - 15) = 50 \text{ joules}$$

ou

$$A = q\,(\varphi_1 - \varphi_2) \text{ joules.}$$

Remarquons que la différence de potentiel entre deux points de champ électrique est aussi appelée tension électrique ou *tension* tout court. Elle est mesurée en volts et désignée par la lettre U.

Ainsi, le travail des forces du champ électrique est:

$$A = qU.$$

Pour déplacer une charge q le long des lignes de force d'un champ homogène d'un point en un autre se trouvant à une distance l il faut fournir un travail :

$$A = Fl = Eql;$$

mais, vu que $A = qU$, on a $U = El$,
d'où

$$E = \frac{U}{l}.$$

Telle est la simple relation existant entre l'intensité et la tension électrique d'un champ homogène.

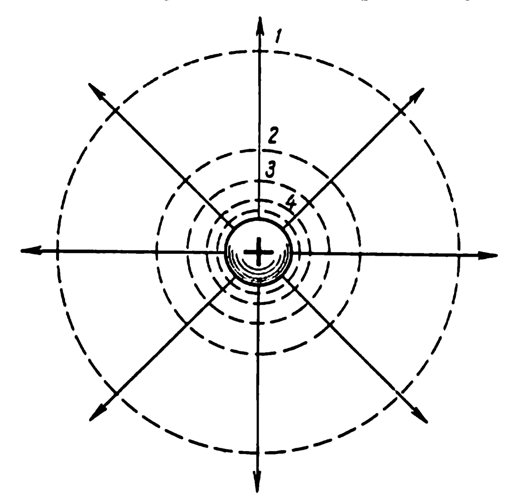


Fig. 13. Surfaces équipotentielles (en pointillé) et lignes de force (en traits pleins) d'une sphère chargée éloignée des autres objets

La disposition des points équipotentiels autour de la surface d'un conducteur chargé dépend de la forme de cette surface. Soit une sphère métallique chargée; les points équipotentiels dans le champ électrique de cette sphère se trouveront sur la surface sphérique qui l'entoure. La *surface équipotentielle* est un moyen graphique commode pour représenter le champ. La figure 13 représente les surfaces équipotentielles d'une sphère à charge positive.

Pour se faire une idée de la variation de la différence de potentiel dans un champ donné, il faut tracer les surfa-

ces équipotentielles de façon que la différence de potentiel entre les points se trouvant sur deux surfaces voisines soit la même, par exemple égale à un volt. Pour cela traçons d'un rayon arbitraire la surface équipotentielle initiale (zéro). On tracera les surfaces suivantes *1*, *2*, *3*, *4* de façon que la différence de potentiel entre les points se trouvant sur une surface donnée et sur les deux surfaces voisines soit égale à 1 volt. Selon la définition de la surface équipotentielle, la différence de potentiel entre les points se trouvant sur la même surface est nulle; pour cette raison, une charge se déplace sur une surface équipotentielle sans dépense de travail.

La figure 13 montre aussi qu'à mesure qu'on se rapproche du corps chargé, les surfaces équipotentielles sont de plus en plus serrées les unes aux autres, le potentiel des différents points du champ augmentant sans cesse, tandis que la différence de potentiel entre les surfaces voisines, selon la condition adoptée, reste toujours la même. Inversement, au fur et à mesure qu'elles s'éloignent du corps chargé, les surfaces équipotentielles se disposent de plus en plus loin les unes des autres. En tout point les lignes de force du champ électrique sont perpendiculaires à la surface équipotentielle, car le travail des forces électriques, lors du mouvement de la charge sur une surface équipotentielle, ne peut être nul qu'à condition que la force soit perpendiculaire au déplacement. La surface d'un conducteur chargé représente une surface équipotentielle, c'est-à-dire que tous les points de la surface d'un conducteur ont le même potentiel, qui est, d'ailleurs, celui de tout point situé à l'intérieur du conducteur.

Si l'on prend deux conducteurs à potentiels différents et on les réunit par un fil métallique, un champ électrique agira le long du fil puisque entre les extrémités du fil il y a une différence de potentiel (ou tension). Sous l'action du champ les électrons libres du fil se mettront en mouvement dans la direction de l'accroissement du potentiel, c'est-à-dire que le fil sera parcouru par un courant électrique. Le mouvement des électrons continuera jusqu'au moment où les potentiels des conducteurs deviendront égaux et la différence de potentiel entre les conducteurs deviendra nulle.

Si l'on réunit par un tube deux récipients contenant de l'eau à niveaux différents, l'eau circulera dans le tube. Le mouvement de l'eau continuera jusqu'au moment

où les niveaux d'eau dans les récipients seront à la même hauteur et la différence de niveau sera nulle.

Vu que tout conducteur chargé, connecté à la terre, perd pratiquement toute sa charge, le potentiel de la terre est considéré comme étant nul.

§ 9. CAPACITÉ ÉLECTRIQUE

La communication d'une charge électrique à un conducteur est appelée *électrisation*. Plus la charge reçue par le conducteur est grande, plus l'électrisation est grande, ou autrement dit, plus son potentiel électrique est élevé.

Entre la quantité d'électricité et le potentiel d'un conducteur isolé donné il existe une relation linéaire : le rapport de la charge du conducteur à son potentiel est une grandeur constante :

$$\frac{q}{\varphi} = C.$$

Pour tout autre conducteur, le rapport de la charge au potentiel est aussi une grandeur constante, qui diffère, cependant, de celle du premier conducteur.

L'une des causes qui déterminent cette différence sont les dimensions du conducteur même. Une même charge communiquée à de différents conducteurs peut créer des potentiels différents. Pour élever le potentiel d'un conducteur d'une unité de potentiel il est nécessaire de lui communiquer une charge déterminée.

La propriété des conducteurs d'accumuler et de retenir une charge électrique mesurée par le rapport de la charge d'un conducteur isolé à son potentiel, est appelée *capacité électrique* ou simplement *capacité* et est désignée par la lettre C :

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Cette formule permet de définir l'unité de capacité.

$$\text{Unité de capacité} = \frac{\text{unité de charge}}{\text{unité de potentiel}}.$$

On mesure la charge en coulombs, le potentiel en volts, et la capacité en farads :

$$1 \text{ farad} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}}.$$

On dit qu'un conducteur possède une capacité de 1 farad si en lui communiquant une charge de 1 coulomb on augmente son potentiel de 1 volt.

Le farad (désigné par F) est une unité de capacité très grande. Pour cette raison, on utilise plus souvent des unités plus petites telles que le microfarad (μF), égal à un millionnième du farad :

$$1\mu F = 10^{-6} F,$$

et le picofarad (pF) égal à un millionnième du microfarad :

$$1 pF = 10^{-6} \mu F = 10^{-12} F.$$

Déterminons l'expression de l'unité pratique, c'est-à-dire du farad, en unités absolues :

$$\frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}} = \frac{3 \cdot 10^9}{1/300} = 9 \cdot 10^{11} \text{ unités absolues de capacité (cm).}$$

Le dispositif destiné à accumuler des charges électriques est appelé *condensateur*. Un condensateur se compose de deux lames (armatures) métalliques séparées l'une de l'autre par une couche de diélectrique. Pour charger un condensateur il faut connecter ses armatures aux pôles d'une machine électrique. Les charges de signes contraires accumulées sur les armatures du condensateur sont liées entre elles par le champ électrique. Les deux lames du condensateur étant rapprochées, elles influent l'une sur l'autre et permettent ainsi d'accumuler une grande charge électrique pour une différence de potentiel relativement basse entre les armatures. On appelle capacité d'un condensateur le rapport de sa charge à la différence de potentiel entre ses armatures:

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{ou} \quad Q = CU.$$

Les mesures montrent que la capacité d'un condensateur augmente lorsqu'on augmente la surface des armatures ou lorsqu'on les rapproche l'une de l'autre. La substance dont est fait le diélectrique influe également sur la capacité du condensateur. Plus la permittivité du diélectrique est élevée plus la capacité du condensateur est grande en comparaison de celle d'un condensateur analogue utilisant comme diélectrique le vide (l'air). En choisissant un diélectrique il faut que celui-ci possède une grande rigidité diélectrique (de bonnes propriétés isolantes). Un mauvais diélec-

trique finit par claquer, ce qui produit la décharge du condensateur. Un diélectrique imparfait provoque des fuites de courant et une décharge progressive du condensateur.

Les lignes de transport d'énergie à haute tension peuvent être considérées en quelque sorte comme les armatures d'un condensateur. On doit considérer la capacité d'un fil non seulement par rapport à l'autre fil, mais aussi par rapport au sol, aux murs des bâtiments et aux objets environnants.

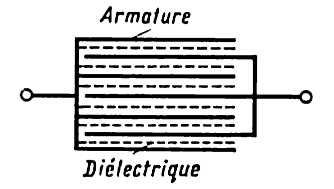


Fig. 14. Organisation d'un condensateur fixe

Les câbles sous-marins et souterrains ont une grande capacité, ce qui est dû au fait que leurs conducteurs se trouvent très près les uns des autres.

Les condensateurs à capacité constante sont appelés *condensateurs fixes.*

Les condensateurs fixes sont généralement composés de feuilles métalliques très fines séparées par du papier paraffiné ou du mica.

Pour augmenter la capacité (la surface des lames du condensateur) on prend souvent plusieurs feuilles métalliques; et on les réunit en deux groupes qui s'enchevêtrent. Pareil condensateur, constitué de groupes de lames séparés par un diélectrique est montré schématiquement sur la figure 14. Parfois, on emploie deux longs rubans métalliques; on place entre eux, ainsi qu'à l'extérieur du papier paraffiné et on enroule le tout en formant un paquet ou un tube. Les condensateurs de grande capacité sont souvent placés dans une boîte métallique remplie de paraffine.

Déterminons la capacité d'un condensateur plan à lames parallèles. Prenons une surface fermée quelconque autour de l'une des lames du condensateur. D'après le théorème de Gauss, le flux du vecteur d'intensité passant par une surface fermée arbitraire, à l'intérieur de laquelle se trouve une charge q, est :

$$\Phi = ES = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}. \tag{a}$$

En supposant que le champ du condensateur est homogène (la distorsion du champ aux bords des lames étant négligée), on obtient :

$$E = \frac{U}{d}, \qquad \text{(b)}$$

où d est la distance entre les lames ou l'épaisseur du diélectrique.

En introduisant dans la formule (a) la valeur de E tirée de la formule (b), on obtient :

$$\frac{U}{d} S = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0},$$

d'où

$$q = U \frac{S\varepsilon\varepsilon_0}{d}.$$

Puisque

$$C = \frac{q}{U},$$

l'expression de la capacité d'un condensateur plan prend la forme suivante :

$$C = S \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{d},$$

où S est la surface des lames en m^2 ;
d est l'épaisseur du diélectrique en m ;
ε est la permittivité du diélectrique.

Ainsi, pour augmenter la capacité d'un condensateur plan, il faut augmenter la surface de ses lames S, diminuer la distance d entre celles-ci et utiliser comme diélectrique une substance à grande permittivité relative (ε).

Les condensateurs dont on peut changer la capacité sont appelés *condensateurs variables*. Le condensateur variable le plus simple comporte plusieurs (rarement, un seul) demi-disques de cuivre ou d'aluminium fixes réunis entre eux. Une autre rangée de demi-disques identiques est calée sur un axe commun. Lorsqu'on tourne l'axe, chacun de ces demi-disques pénètre entre deux demi-disques fixes. En tournant l'axe et en changeant ainsi la disposition réciproque des demi-disques mobiles et fixes on fait varier la capacité du condensateur. La figure 15,*a* montre le schéma et la figure 15,*b* la vue d'ensemble d'un condensateur variable à air.

En radiotechnique on utilise également des condensateurs électrolytiques. Ces condensateurs sont de deux types: à liquide et secs. Dans les deux types de condensateurs on emploie l'aluminium oxydé. Par traitement électrochimique spécial on obtient à la surface de l'aluminium une fine couche (de l'ordre de quelques dizaines de microns)

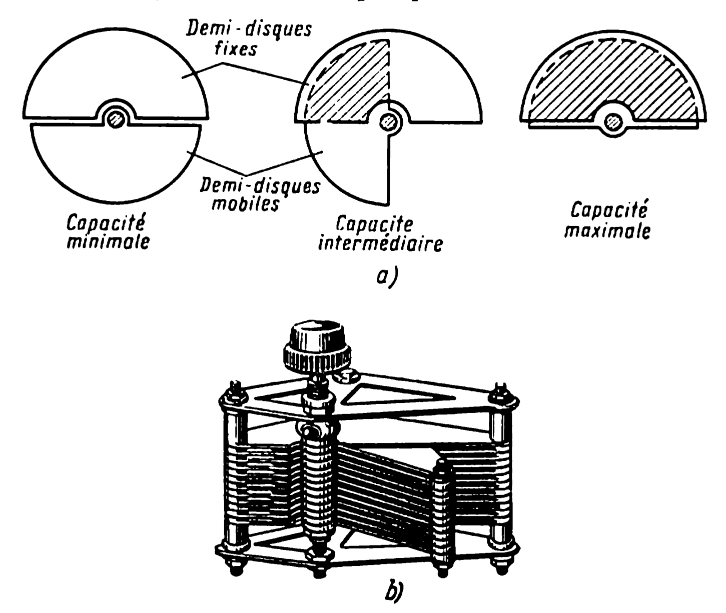


Fig. 15. Condensateur variable:
a — organisation schématique; b — vue d'ensemble

d'alumine Al_2O_3 qui sert de substance isolante au condensateur. L'oxyde d'aluminium est un bon isolant, il a une bonne résistance aux efforts mécaniques et à la chaleur, mais est hygroscopique.

Le principe des condensateurs électrolytiques à liquide est le suivant: la lame d'aluminium oxydé est disposée à l'intérieur d'une boîte métallique, servant de seconde armature. Ensuite on remplit cette boîte d'électrolyte, qui est une solution d'acide borique, avec quelques additions.

Les condensateurs électrolytiques secs sont formés de trois rubans enroulés. Un ruban est en feuille fine d'alu-

minium oxydé. La seconde armature est formée par un ruban de feuille d'aluminium. Entre les deux rubans métalliques on place un ruban de papier ou de gaze imprégné d'électrolyte visqueux. Les rubans bien enroulés sont introduits dans une boîte en aluminium que l'on remplit ensuite de bitume. La fine couche d'oxyde isolant à permittivité élevée ($\varepsilon = 9$) permet d'obtenir des condensateurs à grande capacité par unité de volume et de prix modéré.

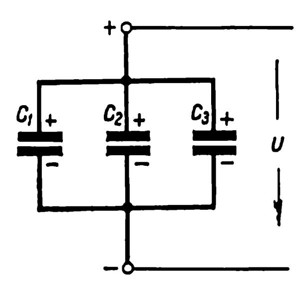


Fig. 16. Couplage des condensateurs en parallèle

Lorsque la capacité d'un condensateur est petite on monte plusieurs condensateurs en parallèle (fig. 16).

Lorsque les condensateurs sont montés en parallèle la tension aux armatures de tous les condensateurs est la même. On peut donc écrire :

$$U_1 = U_2 = U_3 = U.$$

La quantité d'électricité (la charge) de chaque condensateur est :

$$q_1 = C_1U ; \qquad q_2 = C_2U ; \qquad q_3 = C_3U.$$

La charge totale de la batterie de condensateurs est :

$$q = q_1 + q_2 + q_3 ;$$
$$q = C_1U + C_2U + C_3U = U\,(C_1 + C_2 + C_3).$$

En désignant la capacité de la batterie de condensateurs par C, on obtient :

$$q = CU,$$

alors,

$$CU = U\,(C_1 + C_2 + C_3)$$

et, en définitive :

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$

Donc, dans le montage en parallèle, la capacité totale est égale à la somme des capacités des condensateurs séparés. Dans ce cas, chaque condensateur est branché sur la tension du réseau.

Voyons maintenant le couplage des condensateurs en série (fig. 17). Si l'armature gauche du premier condensateur a une charge positive (+), par suite de l'induction électrostatique l'armature droite de ce condensateur aura une

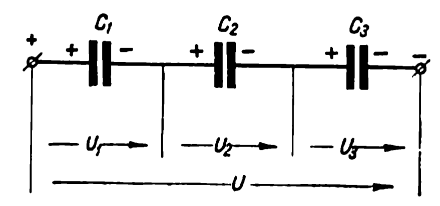


Fig. 17. Couplage des condensateurs en série

charge négative (—), l'armature gauche du deuxième condensateur acquerra une charge positive, celle de droite — une charge négative, et ainsi de suite. Cela veut dire que dans le montage en série chaque condensateur, indépendamment de la valeur de sa capacité, recevra la même charge:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q.$$

La tension appliquée à toute la batterie de condensateurs est égale à la somme des tensions aux armatures de chaque condensateur:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Puisque

$$U_1 = \frac{q}{C_1}; \quad U_2 = \frac{q}{C_2}; \quad U_3 = \frac{q}{C_3},$$

on a pour toute la batterie:

$$U = \frac{q}{C}.$$

On peut maintenant écrire:

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_8}.$$

En divisant par q, on obtient définitivement :

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}.$$

Ainsi, lorsque les condensateurs sont montés en série, l'inverse de la capacité totale est égal à la somme des inverses des capacités des condensateurs pris séparément. Chaque condensateur est branché sur une tension inférieure à celle du réseau.

Les condensateurs sont largement utilisés en radiotechnique, dans les applications techniques des rayons X, en électrotechnique industrielle à haute fréquence, pour l'amélioration du facteur de puissance des installations électriques, etc.

§ 10. DIÉLECTRIQUES

Dans les applications électrotechniques, il faut généralement isoler les parties sous tension par rapport aux pièces mises à la terre et par rapport aux autres pièces sous tension. Cela est nécessaire pour faire suivre au courant l'itinéraire prévu par le circuit électrique de l'installation.

On utilise des diélectriques solides, liquides et gazeux. En tant que diélectriques solides on utilise la porcelaine, le mica, le caoutchouc, le verre, etc., et en tant que diélectriques liquides on emploie l'huile pour transformateurs, l'huile pour câbles et l'huile pour condensateurs, ainsi que les huiles synthétiques tels que le « Sovol » et le « Sovtol ». L'air est le diélectrique gazeux employé le plus souvent.

Une molécule de diélectrique comprend des ions positifs et négatifs, ainsi que des électrons. Un diélectrique a très peu d'électrons libres.

Cependant, un diélectrique n'est pas un isolant absolu. A l'état ordinaire, les charges élémentaires d'une molécule de diélectrique se trouvent en mouvement thermique désordonné oscillant autour de leur centre d'équilibre. Si on branche un diélectrique dans un circuit à tension constante (condensateur), les charges élémentaires des molécules du diélectrique se déplaceront sous l'effet du champ électrique dans le sens des forces qui agissent sur elles. Le déplacement des charges à l'intérieur du diélectrique provoquera dans le circuit un courant de courte durée, appelé *courant de polarisation*. Au bout d'un temps très court (10^{-13} à 10^{-15} s), le courant de polarisation cesse complètement.

Considérons encore un courant pouvant circuler longtemps à travers le diélectrique. Dans un diélectrique réel il y a toujours des ions et des électrons libres. Bien que leur nombre soit très petit, il faut en tenir compte. Sous l'effet du champ électrique, les ions et les électrons libres commencent à se déplacer à l'intérieur du diélectrique, en formant ce qu'on appelle un *courant de fuite*. L'intensité du courant de fuite est dans certains cas de beaucoup supérieure à celle du courant de polarisation. En passant par le diélectrique, le courant de fuite, d'après la loi de Joule-Lenz, dégage de la chaleur, ce qu'il ne faut pas oublier lors des calculs des circuits. Si l'on branche un diélectrique dans un circuit de tension alternative, la polarisation aura lieu tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre et un courant alternatif apparaîtra dans le circuit. Or, un phénomène qui se répète sans cesse exige une dépense d'énergie. Le déplacement périodique des ions et des électrons libres à l'intérieur du diélectrique sera à l'origine d'un courant de fuite.

Les principales caractéristiques d'un diélectrique sont les suivantes: 1) la résistivité; 2) la permittivité; 3) l'angle de pertes diélectriques; 4) la rigidité diélectrique.

§ 11. RÉSISTIVITÉ

Nous avons vu précédemment qu'un diélectrique n'est pas un isolant absolu: il laisse passer un courant de fuite. La grandeur de ce dernier est très petite par rapport aux courants de service qui circulent dans les parties sous tension des installations électriques (fils, barres, câbles). Le courant a deux itinéraires possibles: ou bien il passe à travers le diélectrique même ou bien il s'écoule par sa surface (fig. 18). Le courant total I_f (le courant de fuite) est égal à la somme du courant traversant le diélectrique (courant volumique) I_v et du courant superficiel du diélectrique I_s:

$$I_f = I_v + I_s.$$

Ainsi, deux sortes de résistances s'opposent au courant de fuite: la résistance volumique r_v et la résistance superficielle r_s. La résistance totale du diélectrique r_d est:

$$r_d = \frac{U}{I_f}, \quad \text{où} \quad r_d = \frac{r_v r_s}{r_v + r_s}.$$

La résistance d'une unité de volume est appelée *résistivité volumique* et est désignée ρ_U.

On admet comme unité de résistance volumique la résistance d'un centimètre cube de substance donnée, au cas où le courant passe par deux faces opposées du cube (fig. 19).

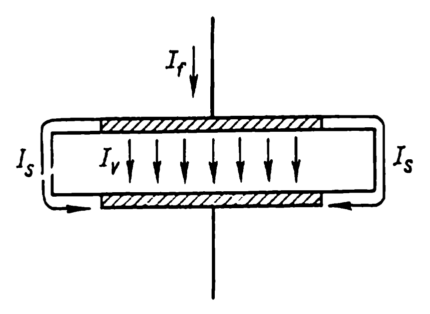


Fig. 18. Courant de fuite d'un diélectrique

La résistance volumique est mesurée en ohm-centimètres (Ω·cm) et est déterminée par la formule:

$$r_v = \rho_U \frac{h}{S},$$

où h est l'épaisseur du diélectrique en cm, et S est l'aire de la face latérale en cm².

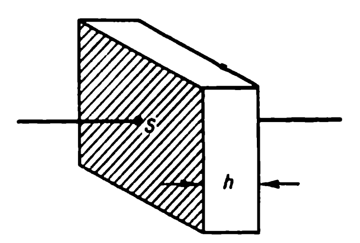


Fig. 19. Résistance volumique d'un diélectrique

La résistance d'une unité de surface du diélectrique est appelée *résistivité de surface*. Elle est désignée par ρ_s et est mesurée en ohms.

Pour unité de résistance superficielle on prend la résistance d'un rectangle aux dimensions arbitraires découpé dans la surface du diélectrique lorsque le courant passe par deux faces opposées de ce rectangle (fig. 20).

La résistance de surface est déterminée par la formule:

$$r_s = \rho_s \frac{a}{b},$$

où a est la distance entre les deux électrodes parallèles, b est la largeur des électrodes.

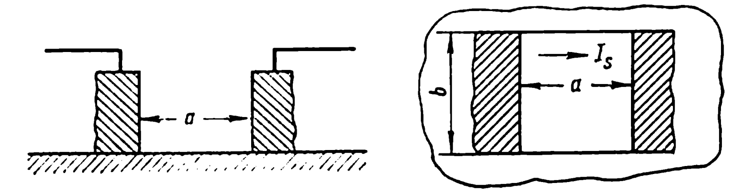


Fig. 20. Résistance superficielle d'un diélectrique

La résistivité d'un diélectrique dépend de son état (gazeux, liquide ou solide), de sa composition et de la température du milieu ambiant.

§ 12. PERMITTIVITÉ

La permittivité est une grandeur qui caractérise la capacité du diélectrique placé entre les armatures d'un condensateur. On sait que la capacité d'un condensateur à lames planes parallèles dépend de l'aire des armatures (plus l'aire des armatures est élevée, plus la capacité est grande), de la distance entre les armatures ou de l'épaisseur du diélectrique (plus le diélectrique est épais, plus la capacité du condensateur est petite), ainsi que de la substance du diélectrique qui est caractérisée par la permittivité.

La permittivité est numériquement égale au rapport de la capacité d'un condensateur doté d'un diélectrique à celle d'un condensateur à air de mêmes dimensions. Pour créer des condensateurs aux dimensions réduites, il faut utiliser des diélectriques à grande permittivité. La permittivité de la plupart des diélectriques est de plusieurs unités.

Dans l'électrotechnique on utilise des diélectriques à grande et très grande permittivité dont le composant principal est le rutile (bioxyde de titane).

§ 13. ANGLE DE PERTES DIÉLECTRIQUES

Au § 10 nous avons examiné des exemples de branchement d'un diélectrique dans les circuits à courant continu et à courant alternatif. Il s'avère que si un diélectrique réel

se trouve dans un champ électrique à tension alternative il se produit un dégagement d'énergie thermique. On appelle *pertes diélectriques* la puissance absorbée lorsque ce phénomène a lieu. Au § 88 on verra que dans un diélectrique parfait, le courant de capacité devance de 90° la tension. Dans un diélectrique réel le courant de capacité devance la tension d'un angle inférieur à 90°. La diminution de l'angle dépend du courant de fuite appelé aussi courant de conduction. La différence entre 90° et l'angle de déphasage entre la tension et le courant passant dans un circuit comportant un diélectrique réel, est appelée *angle de pertes diélectriques* ou simplement angle de pertes et est désignée par δ (delta). Le plus souvent, on détermine la tangente de cet angle: tg δ et non pas l'angle δ lui-même.

On démontre que les pertes diélectriques sont proportionnelles au carré de la tension, à la fréquence du courant alternatif, à la capacité du condensateur et à la tangente de l'angle de pertes diélectriques.

Il en résulte que plus tg δ est grande moins bonne est la substance du point de vue diélectrique et plus grandes y sont les pertes d'énergie. Les substances à tg δ relativement grande (de l'ordre de 0,08 à 0,1 et plus) sont de mauvais isolants. Les matériaux à tg δ relativement petite (de l'ordre de 0,0001) sont, par contre, de bons isolants.

§ 14. RIGIDITÉ DIÉLECTRIQUE

La rigidité diélectrique est l'une des principales caractéristiques des isolants. L'intensité de champ électrique avec laquelle un isolant peut travailler normalement ne doit pas dépasser une certaine valeur bien déterminée. Si cette valeur est dépassée, le travail du diélectrique est perturbé et il est traversé par une étincelle donnant origine à un arc. Le diélectrique perd alors ses propriétés isolantes, sa résistance diminue fortement et les pièces sous tension précédemment séparées par un intervalle isolant sont courtcircuitées. C'est le percement ou claquage du diélectrique. La tension sous laquelle a lieu le percement est appelée *tension disruptive* U_d et l'intensité de champ correspondante est appelée *intensité disruptive* ou rigidité diélectrique E_d:

$$E_d = \frac{U}{h} \left(\frac{\text{kV}}{\text{cm}} \text{ ou } \frac{\text{kV}}{\text{mm}} \right),$$

où h est l'épaisseur du diélectrique.

Il est évident qu'un isolant ne doit pas travailler sous une tension pouvant provoquer son claquage.

On distingue deux sortes de claquage d'un diélectrique solide: le claquage électrique et le claquage thermique. Le claquage électrique est dû à la dégradation de la structure du diélectrique sous l'effet du champ électrique. Dans un champ électrique faible les charges électriques se déplacent d'une façon élastique, en provoquant la polarisation du diélectrique. Mais si l'intensité de champ atteint la valeur de la rigidité diélectrique, il se produit un décrochage des particules chargées de leurs positions initiales, ce qui provoque le claquage.

Examinons le phénomène de claquage thermique.

On sait que lors de l'introduction d'un diélectrique dans un champ électrique alternatif il s'y dégage une certaine quantité de chaleur par suite des pertes électriques. Si le diélectrique a un coefficient de température de résistance négatif, son échauffement sera accompagné d'une diminution de la résistance du diélectrique. Cela fera augmenter le courant traversant le diélectrique et provoquera un échauffement encore plus intense de ce dernier. Ainsi, l'échauffement augmente jusqu'à dégradation (fusion, carbonisation, etc.) du matériau.

Le claquage des diélectriques gazeux (de l'air) est provoqué par la formation et le mouvement des ions dans un milieu gazeux, lorsque l'intensité de champ électrique est très grande. A un moment donné, le mouvement rapide des ions provoque leur collision avec des molécules neutres du gaz et la formation de nouveaux ions. Ce phénomène est accompagné d'un fort accroissement du nombre d'ions dans le gaz, par suite de quoi la résistance de celui-ci diminue (ionisation par chocs). C'est le claquage du diélectrique gazeux.

Dans un champ électrique homogène (entre deux pointes, entre une pointe et une surface plane, entre les fils des lignes à haute tension, etc.), aux endroits où l'intensité du champ atteint une valeur critique, apparaît une décharge silencieuse accompagnée d'un crépitement avec formation d'une lueur violette (phénomène de couronne). Avec l'accroissement de la tension, la décharge silencieuse peut se transformer en décharge par étincelles, ensuite en une décharge en brosse et enfin en une décharge en arc (si la puissance de la source de tension est suffisamment grande).

Le percement de l'air à la surface du diélectrique solide est appelée *décharge superficielle* (contournement). Afin d'augmenter la surface des pièces isolantes on la fait ondulée.

L'humidité, les gaz, les impuretés mécaniques et chimiques influent fortement sur la rigidité diélectrique des isolants liquides. Le claquage de ces diélectriques a lieu par suite de la surchauffe du liquide et de la destruction de ses molécules.

§ 15. PRINCIPAUX MATÉRIAUX ISOLANTS

A m i a n t e. C'est un minéral à structure fibreuse. La longueur des fibres est comprise entre quelques dixièmes de millimètre et plusieurs centimètres. On utilise l'amiante pour la fabrication de filés, de rubans, de tissus, de papier, de carton et d'autres articles. La haute tenue à la chaleur est la principale qualité de l'amiante qui ne change pas ses propriétés lorsqu'on le chauffe jusqu'à 300 ou 400 °C. Grâce à sa faible conductibilité thermique l'amiante est utilisé comme calorifuge pour hautes températures. Il est hygroscopique, mais lorsqu'on l'imprègne de résine, de bitume, etc., son hygroscopicité diminue. Les fibres d'amiante imprégnées de bitume et collées au conducteur à l'aide de vernis forment une isolation dite amiante-delta. L'amiante est utilisé comme charge pour la fabrication des matières plastiques. Les propriétés isolantes de l'amiante sont réduites et sa rigidité diélectrique est de 0,6 à 1,2 kV/mm.Pour cette raison il n'est pas utilisé dans l'appareillage de haute tension.

A m i a n t e - c i m e n t. C'est une masse plastique pressée à froid et qui se compose de fibres d'amiante et de ciment. L'amiante-ciment est utilisé pour la fabrication des tableaux, des panneaux, des embases d'appareils, des tubes, etc. Il présente de bonnes propriétés mécaniques, une haute résistance à l'arc électrique, à la chaleur, et il est ininflammable. Les propriétés isolantes de l'amiante-ciment sont faibles. L'imprégnation de l'amiante-ciment avec de la paraffine, de l'huile de lin, du bitum, etc., diminue son hygroscopicité.

B a k é l i t e. C'est une résine artificielle obtenue par cuisson du phénol (alcool) avec de la formaline (solution aqueuse de formaldéhyde, qui est un produit d'oxydation de l'alcool). La masse obtenue par cuisson est appelée

bakélite A. La température de ramollissement de la bakélite A est d'environ 80 °C. La bakélite peut être dissoute dans l'alcool et dans l'acétone. Sous une température de 110 à 140 °C, la bakélite A se transforme en bakélite C qui ne fond pas et ne se dissout pas. On utilise la bakélite pour l'imprégnation du bois et d'autres matériaux, pour la fabrication des matières plastiques, telles que le guétinax, la textolite, ainsi que pour le collage des contreplaqués. La rigidité diélectrique de la bakélite est de 10 à 20 kV/mm ; $\varepsilon = 4,5$ à 6.

P a p i e r. Il est fabriqué par traitement spécial du bois à l'alcali. Dans l'électrotechnique on utilise les sortes de papiers isolants suivants: papiers pour condensateurs, à câbles, pour la fabrication du guétinax en feuilles, pour la fabrication des cylindres en papier bakélisé, pour la fabrication des rubans micacés et pour l'isolement des tôles d'acier magnétique.

H a l o w a x. On l'obtient par chlorage de la naphtaline. Le point de fusion de l'halowax est compris entre 95 et 135 °C. Vu sa permittivité élevée (environ 5), l'halowax est utilisé pour l'imprégnation des condensateurs au papier. A la différence de la paraffine et de la cérésine, l'halowax n'est pas inflammable.

G u é t i n a x. Il est fabriqué à partir de papier imprégné de résine artificielle (bakélite). Les feuilles de papier sont serrées à la presse avec échauffement simultané jusqu'à 160 ou 165 °C, de sorte que la bakélite A se transforme en bakélite C. De cette façon on obtient des planches de guétinax de différentes épaisseurs comprises entre 0,5 et 50 mm. Le guétinax est facile à usiner: il peut être foré, tourné, fraisé et scié. Le guétinax de 2,5 à 3 mm d'épaisseur peut être estampé. Sous l'action d'un arc électrique la surface brillante du guétinax se carbonise et devient conductrice. Le guétinax est utilisé pour la fabrication des tableaux, des panneaux, des cales, des carcasses isolantes de transformateurs. La rigidité diélectrique du guétinax est de 20 à 25 kV/mm, $\varepsilon = 5$ à 6.

B o i s. C'est un matériau naturel organique de structure fibreuse. Il est utilisé pour la fabrication des pièces isolantes qui ne sont pas soumises à une tension élevée. Pour la fabrication de ces pièces on emploie généralement des essences feuillues (bouleau, chêne, hêtre, érable). Pour accroître la rigidité diélectrique du bois on l'imprègne de

paraffine, d'huile de lin, de résine. En électrotechnique on utilise le bois pour les pièces de fixation des transformateurs, les coins d'encoche des machines électriques, les poteaux de lignes de transmission et de transport d'énergie, etc.

C o l o p h a n e. C'est une résine fragile, jaune claire ou marron obtenue par traitement de la résine des conifères. La colophane se dissout dans l'huile de pétrole, les hydrocarbures liquides, les huiles végétales, l'alcool et la térébenthine. La température de ramollissement de la colophane est comprise entre 50 et 70°. Sa rigidité diélectrique est de 10 à 15 kV/mm. La colophane est utilisée pour la préparation des matières d'imprégnation et de remplissage.

C a r t o n i s o l a n t. Il diffère du papier par son épaisseur plus élevée. On fabrique deux sortes de carton: ЭВ pour être utilisé à l'air libre et ЭМ pour travailler dans l'huile. Le carton est utilisé pour la fabrication des petites pièces. Sa rigidité diélectrique est de 8 à 10 kV/mm; $\varepsilon = 2{,}5$ à 4.

C a o u t c h o u c. Il est obtenu à partir du latex. Un tel caoutchouc est appelé naturel, mais on fabrique également du caoutchouc artificiel. Le caoutchouc artificiel ou synthétique est obtenu à partir de l'alcool ou des produits pétroliers. Le caoutchouc chauffé à 50 °C se ramollit et devient collant, tandis qu'à basse température il devient fragile. Le caoutchouc se dissout bien dans les hydrocarbures et dans le sulfure de carbone. Afin d'augmenter la résistance mécanique du caoutchouc, sa résistance à la chaleur, au froid et aux solvants on y ajoute 3 à 10 % de soufre. Ce processus est appelé *vulcanisation*. En électrotechnique on utilise le caoutchouc vulcanisé pour isoler les fils de montage et les câbles, pour la fabrication des tubes isolants, des gants, des tapis isolants, etc. Le caoutchouc vulcanisé possède des propriétés isolantes élevées et une bonne résistance à l'humidité. Il est imperméable à l'eau et aux gaz, mais sa résistance à la chaleur est faible (chauffé à une température dépassant 60 °C, le caoutchouc devient fragile et présente des fissures). Sous l'action des huiles de pétrole il gonfle et sous l'action de la lumière il vieillit. La rigidité diélectrique du caoutchouc vulcanisé est de 24 kV/mm; $\varepsilon = 2{,}5$ à 3.

V e r n i s i s o l a n t s. Ce sont des solutions des substances durcissables (résines, bitume, huiles siccatives, etc.) dans les solvants volatils (essence, benzène, alcool,

éther, acétone, térébenthine, etc.). Les vernis isolants se divisent en trois groupes: vernis d'imprégnation, vernis de revêtement et vernis collants. Les vernis d'imprégnation servent à imprégner les isolants poreux, fibreux ou solides (papier, carton, filés, tissus, isolations des enroulements des machines et appareils électriques). Les vernis de revêtement servent à créer sur différents objets une pellicule solide, résistante à l'eau. A l'aide de vernis collants on colle ensemble des feuilles de mica. Selon le procédé de séchage, les vernis se divisent en vernis séchés au four et en vernis séchés à l'air.

Tissus vernis. Ils sont fabriqués en tissus coton, soie ou verre qui sont ensuite imprégnés de vernis à l'huile ou de vernis à base d'huile et de bitume. Les tissus vernis sont employés pour l'isolement des enroulements de machines et d'appareils électriques. Les tissus vernis coton ont une épaisseur de 0,15 à 0,25 mm et une rigidité diélectrique de 35 à 40 kV/mm. Les tissus vernis soie ont une épaisseur de 0,05 à 0,1 mm et une rigidité diélectrique de 1,5 à 2 fois plus grande que celle des tissus vernis coton.

Huile pour transformateurs. Ce produit est obtenu par distillation fractionnée du pétrole. Dans les appareils électriques l'huile sert à assurer un bon isolement électrique. Dans les transformateurs de puissance elle sert aussi de réfrigérant. Dans les disjoncteurs à l'huile elle est utilisée pour extinction des arcs. L'huile pour transformateurs est également utilisée pour le remplissage des entrées à haute tension et comme composant de différentes matières de remplissage. Les huiles de pétrole spécialement épurées sont utilisées dans les condensateurs et dans les câbles. La caractéristique la plus importante de l'huile pour transformateurs, du point de vue isolant, est sa rigidité diélectrique qui est de 5 à 18 kV/mm; $\varepsilon = 2,2$.

Marbre. C'est une pierre à structure cristalline grenue. Les blocs de marbre sont sciés en plaques qui sont ensuite fraisées et polies. Les principaux défauts du marbre sont les suivants: hygroscopicité, fragilité, formation de fissures lors d'un échauffement élevé, décomposition par les acides. Imprégné de paraffine, de bitume, de colophane le marbre devient pratiquement non hygroscopique. Sa rigidité diélectrique est de 2,5 à 3,5 kV/mm; $\varepsilon = 8$.

Paraffine. C'est une substance cireuse tirée du pétrole. Bien purifiée, elle est cristalline et blanche

On l'emploie pour l'imprégnation du bois, du papier, des substances fibreuses, pour le remplissage des bobines de haute fréquence et des transformateurs, pour la fabrication des compositions isolantes. La paraffine n'est pas soluble dans l'eau et dans l'alcool, mais elle l'est dans des hydrocarbures liquides: huile de pétrole, essence, benzène. Le poids spécifique de la paraffine est de 0,85 à 0,9 et la température de fusion de 50 à 55 °C. Sa rigidité diélectrique est de 16 à 30 kV/mm ; $\varepsilon = 2,1$ à 2,2.

M a t i è r e s   p l a s t i q u e s. Elles se composent d'un liant (résine, bitume, etc.) et d'une charge (« farine de pierre », « farine de bois », fibres de coton, d'amiante ou de verre, mica, papier, tissu, etc.). En plus, dans la composition des matières plastiques entrent aussi des plastifiants qui diminuent la fragilité et des colorants qui assurent à l'article la couleur requise. Le mélange de liant et de charge est introduit dans un moule et par pression et chauffage (parfois seulement par pression) on obtient l'article de dimensions et forme requises. Les matières plastiques sont utilisées comme isolants et comme matériaux de construction.

C o m p o s i t i o n s   d'i m p r é g n a t i o n   e t   d e   r e m p l i s s a g e (compounds). Elles sont utilisées pour l'imprégnation et le remplissage de différentes parties des installations électriques. Ces compositions isolent les pièces sous tension, forment une isolation résistante à l'humidité et améliorent les conditions de refroidissement. Les compositions d'imprégnation et de remplissage comprennent des bitumes tirés du pétrole et des mélanges de l'huile minérale avec de la colophane. Parfois, pour accroître la conductibilité thermique on introduit dans le bitume une charge, par exemple, du sable quartzeux.

M i c a. C'est un minéral de structure cristalline, qui se clive facilement. Il possède une rigidité diélectrique élevée (80 à 200 kV/mm), une haute résistance à la chaleur, à l'humidité ainsi qu'une résistance mécanique et une flexibilité élevées. En électrotechnique, on utilise deux sortes de mica: la muscovite et la phlogopite qui diffèrent par leur composition, couleur et propriétés. C'est la muscovite qui présente de meilleures qualités. Avec des feuilles de mica on fabrique des plaques rectangulaires pour condensateurs, des rondelles pour les appareils électriques, etc. Mais plus souvent les feuilles de mica sont collées

les unes aux autres avec un vernis collant (vernis à base de résine glycérophtalique, à base de bitume et d'huile, à base de gomme-laque). Un tel matériau est appelé micanite. On distingue: la micanite pour l'isolement des lames de collecteurs, la micanite pour cales, rondelles, la micanite moulable (usinée à chaud à la presse et destinée à la fabrication des pièces profilées), la micanite souple (pour isolation des spires et des encoches des machines électriques) et la micanite réfractaire (pour les appareils de chauffage). Parfois, on colle les lamelles de mica sur du papier ou sur du tissu (ruban micacé, micafolium, micafolium armé de verre).

V e r r e. Il est obtenu par fusion de la silice SiO_2 (sous forme de sable) avec les oxydes de différents métaux: sodium, potassium, plomb, calcium (sous forme de soude, salpêtre, borax et différentes roches). Le verre est un corps amorphe et, pour cette raison, il n'a pas de température de fusion déterminée. Lorsqu'on le chauffe, le verre se ramollit et devient liquide. A cet état on peut le souffler, étirer, former à la presse, couler. Les propriétés physiques et mécaniques du verre dépendent de sa composition et de son traitement. Si le verre ordinaire est fragile, un verre spécialement trempé présente une grande résistance aux chocs. Le verre est imperméable à l'eau, les acides (sauf l'acide fluorhydrique) et les alcalis n'agissent pas sur lui. Mais, les verres qui contiennent seulement des oxydes basiques (Na_2O, K_2O) sont bien solubles dans l'eau (verre liquide). Les propriétés isolantes du verre sont très marquées, mais elles disparaissent rapidement avec l'échauffement. En électrotechnique, on utilise le verre pour la fabrication des ampoules de lampes d'éclairage et de tubes électroniques, des isolateurs, etc. On peut obtenir des fibres de verre de 0,005 ou 0,006 mm de diamètre. Les fibres sont toronnées pour former des fils. Les fils de verre sont utilisés pour obtenir une isolation réfractaire des conducteurs de marque ПСД. La rigidité diélectrique du verre est de 10 à 40 kV/mm; $\varepsilon = 5,5$ à 10.

T e x t o l i t e. C'est une matière plastique formée par un tissu multicouches imprégné de résine de résol et comprimé sous une forte pression à 150 °C. Comparé au guétinax il présente les propriétés suivantes: fragilité moindre, hautes propriétés mécaniques et tenue à l'attrition. Ses défauts sont: propriétés électriques plus faibles, moindre tenue à l'humidité, prix élevé (5 à 6 fois supérieur à celui

du guétinax). Le textolite à base de tissu de verre est appelé textolite armé de verre. Il présente des propriétés électriques élevées, une bonne tenue à l'humidité et à la chaleur et une résistance mécanique élevée. Le textolite est facilement usiné. Il est utilisé pour la fabrication de galets, de roues dentées, de coussinets de paliers, etc. La rigidité diélectrique du textolite est de 27 à 45 kV/mm.

P o r c e l a i n e. C'est le matériau isolant céramique le plus répandu. Elle se compose du kaolin, de l'argile réfractaire, du quartz et du feldspath. La fabrication des articles en porcelaine comprend les opérations suivantes: broyage des composants de la porcelaine et leur malaxage avec de l'eau pour former une masse homogène. Par pressage, tournage, coulage dans des moules ou par extrusion on obtient de cette masse des ouvrages de forme requise. Pour éliminer l'eau en excédent, les ouvrages sont soumis au séchage, ensuite ils sont couverts de glaçure, ce qui diminue leur hygroscopicité, leur donne une coloration déterminée et assure une surface uniforme et polie lors de la cuisson. Après cela les ouvrages sont de nouveau séchés et cuits à la température de 1320 à 1450 °C. La porcelaine a une haute résistance à la chaleur, une tenue aux arcs électriques et une très faible hygroscopicité. On fabrique en porcelaine des isolateurs (suspendus et à tige) pour les lignes de transport, des isolateurs de support et de traversée, des isolateurs pour appareillages électriques et de nombreuses autres pièces (poulies, éléments de coupe-circuit, de douilles, de prises de courant, etc.). La rigidité diélectrique de la porcelaine est comprise entre 6 et 10 kV/mm ; $\varepsilon = 5$ à 6,5. On utilise également un autre matériau céramique appelé s t é a t i t e et fabriqué à base de talc. La stéatite présente des propriétés isolantes et mécaniques supérieures à celles de la porcelaine.

F i b r e. Elle est fabriquée en papier poreux traité dans une solution de chlorure de zinc et est facilement usinée. Son hygroscopicité est son défaut principal; elle est attaquée par les acides et les alcalis. On fabrique en fibre de petites pièces, des garnitures, des carcasses de bobines. La rigidité diélectrique de la fibre est de 5 à 11 kV/mm ; $\varepsilon = 2{,}5$ à 5. La fibre fine (0,1 à 0,5 mm) est appelée létéroïde.

C é r é s i n e. Elle est obtenue par purification de la cire minérale, appelée ozokérite, ou du pétrolatum. Comparée à la paraffine, la cérésine a une température de fusion

plus élevée (65 à 80 °C) et une meilleure tenue à l'oxydation. Elle est utilisée pour l'imprégnation des condensateurs au papier, pour la préparation des compositions isolantes, etc. La rigidité diélectrique de la cérésine est de 15 kV/mm.

S o i e. Elle est tirée des cocons du ver à soie. L'épaisseur du fil est de 0,01 à 0,015 mm. Les fils de soie sont utilisés pour l'isolement des conducteurs et la fabrication des tissus.

G o m m e - l a q u e. C'est une résine naturelle produite par certaines plantes tropicales. Sa température de fusion est de 100 à 200 °C. La gomme-laque se présente sous forme d'écailles jaunâtres ou brunes facilement solubles dans l'alcool. Elle est utilisée pour la réalisation des compositions de remplissage, des vernis isolants et collants, pour l'imprégnation des rubans isolants; $\varepsilon = 2,7$ à 3,7.

A r d o i s e. C'est un schiste de structure stratifiée. L'ardoise n'est pas hygroscopique et est facile à usiner. Elle sert à la réalisation de panneaux, de tableaux pour interrupteurs à couteaux, etc. La rigidité diélectrique de l'ardoise est de 1,5 à 3 kV/mm; $\varepsilon = 6$ à 7,5.

E b o n i t e. C'est un caoutchouc vulcanisé dans lequel la proportion de soufre est de 20 à 50 %. L'ébonite est fabriquée sous forme de feuilles, de tiges et de tubes. Elle est facile à usiner. On utilise l'ébonite dans les installations de courants faibles et les tubes d'ébonite sont placés dans les murs par lesquels on fait passer des fils électriques.

Problèmes

1. Deux charges électriques de $5 \cdot 10^{-5}$ C et $3 \cdot 10^{-4}$ C se trouvent dans le vide et sont séparées par une distance de 10 cm. Calculer la force d'interaction de ces charges.

2. Deux charges électriques de 40 unités ESCGS et 25 unités ESCGS se trouvent dans l'huile pour transformateurs à 5 cm l'une de l'autre. Calculer la force d'interaction de ces charges.

3. Sur une charge de $2 \cdot 10^{-7}$ C agit une force de 0,1 N. Déterminer la distance à laquelle se trouve la seconde charge de $4,5 \cdot 10^{-7}$ C. Les deux charges se trouvent dans le vide.

4. Quelle est l'intensité de champ électrique à une distance de 20 cm d'une charge de $2 \cdot 10^{-6}$ C dans le vide.

5. Calculer la valeur de la charge qui crée un champ électrique dans le vide, dont l'intensité à 30 cm de distance est égale à 40 V/cm.

6. Déterminer le potentiel en un point donné du champ électrique si pour le transfert d'une charge de $5 \cdot 10^{-7}$ C dans ce point du champ on a dépensé un travail de 0,05 joule.

7. Le potentiel d'un point A est de 50 V et celui d'un point B est de 80 V. Calculer le travail qu'on doit fournir pour transférer une charge de 5 C du point A au point B.

8. Calculer la capacité d'un conducteur si son potentiel a augmenté de 500 V lorsqu'on lui a communiqué une charge de $2 \cdot 10^{-3}$ C.

9. Calculer la capacité d'un condensateur à lames parallèles, si la surface de ses armatures est égale à 40 cm². Le condensateur comporte un diélectrique en papier épais de 0,1 mm, imprégné de paraffine.

Questions de contrôle

1. Quelle est la structure de l'atome selon la théorie électronique?
2. Qu'est-ce qu'un conducteur? Un isolant? Donner des exemples.
3. Comment se lit la loi de Coulomb? A quoi sert la formule de Coulomb?
4. Qu'est-ce qu'un champ électrique?
5. Qu'est-ce que l'intensité d'un champ électrique?
6. Comment peut-on déterminer graphiquement l'intensité d'un champ électrique créé par plusieurs charges électriques ponctuelles?
7. Comment la forme des conducteurs influence-t-elle la répartition de la charge électrique?
8. Que subit un conducteur lorsqu'il est introduit dans un champ électrique?
9. Que subit un diélectrique lorsqu'il est introduit dans un champ électrique?
10. Qu'est-ce qu'un potentiel électrique? En quelles unités est-il mesuré? Comment peut-on le déterminer?
11. Comment peut-on déterminer le travail requis pour transporter une charge d'un point du champ électrique en un autre?
12. Qu'est-ce que la capacité électrique? En quelles unités estelle mesurée?
13. Comment sont constitués les condensateurs électriques et quelle est leur destination?

CHAPITRE II

LOIS FONDAMENTALES DU COURANT CONTINU

§ 16. NOTION DE COURANT ÉLECTRIQUE

Soient deux sphères métalliques A et B montées sur des supports isolants (fig. 21). Chargeons la sphère A avec de l'électricité positive et la sphère B avec de l'électricité négative. Si on réunit ces sphères par un conducteur métallique, les électrons passeront de la sphère B, où il y en

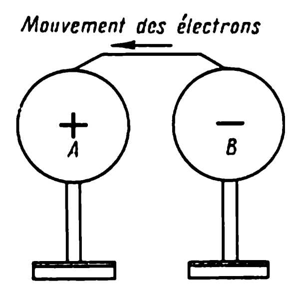


Fig. 21. Mouvement des électrons dans un conducteur

a de trop, sur la sphère A où il y en a pas assez. *La circulation des électrons dans un conducteur est appelée courant électrique* [1]. Dans leur mouvement les électrons ne parcourent pas toute la longueur du conducteur. Au contraire, ils ne parcourent que de très faibles distances jusqu'à la collision avec d'autres électrons, atomes ou molécules. Ces distances sont appelées *longueur de libre parcours des électrons.*

Si on charge continuellement la sphère A avec de l'électricité positive et la sphère B avec de l'électricité négative,

[1] Dans l'électrotechnique on a adopté, par convention, pour sens du courant électrique le sens opposé à celui du déplacement des électrons dans le conducteur. Autrement dit, on a pris comme sens du courant le sens de déplacement des charges positives.

le courant dans le conducteur circulera également de façon continue.

En pratique, on obtient le courant électrique à partir des sources spéciales telles que piles hydroélectriques, accumulateurs et générateurs.

Il est impossible d'observer directement le courant électrique. On peut juger de son passage seulement d'après son effet. Nous examinerons de plus près les effets du courant électrique dans les chapitres correspondants du livre. Pour le moment, notons seulement les signes suivants d'après lesquels on peut facilement juger du passage d'un courant électrique :

1) en passant par les solutions de sels, de bases d'acides ainsi que par les sels fondus, le courant les décompose en parties constituantes;

2) un conducteur parcouru par un courant électrique s'échauffe;

3) un courant électrique parcourant un conducteur crée autour de ce dernier un champ magnétique.

§ 17. CIRCUIT ÉLECTRIQUE ET SES ÉLÉMENTS

L'installation électrique la plus simple comprend une source de tension (pile, accumulateur, génératrice, etc.) des récepteurs d'énergie électrique (lampes à incandescence,

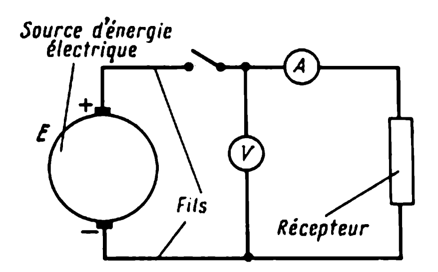


Fig. 22. Schéma d'un circuit électrique

appareils de chauffage, moteurs électriques, etc.) et des fils de connexion qui réunissent les bornes de la source de tension aux bornes du récepteur.

La source fournit de l'énergie électrique et le récepteur la transforme en d'autres formes d'énergie: lumière, chaleur, mouvement mécanique, etc. L'ensemble comprenant

les sources d'énergie électrique, les récepteurs et les fils de connexion (lignes de transmission) est appelé *circuit électrique* (fig. 22). Ce circuit comporte une partie interne et une partie externe. La partie interne comprend le générateur. La partie externe comprend les fils de connexion, les récepteurs, les interrupteurs, les appareils de mesure, c'est-à-dire tout ce qui est connecté aux bornes du générateur.

Un courant électrique continu peut circuler seulement dans un circuit fermé. La coupure du circuit en un endroit quelconque provoque l'arrêt du courant.

§ 18. INTENSITÉ DE COURANT. DENSITÉ DE COURANT

Si la section du conducteur est traversée par Q coulombs en t secondes, la quantité d'électricité la traversant pendant une seconde est appelée intensité de courant et est désignée par la lettre I.

$$I = \frac{Q}{t}.$$

L'unité d'intensité de courant est l'ampère que l'on détermine comme la quantité d'électricité de 1 coulomb traversant la section du conducteur en une seconde:

$$1 \text{ ampère} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ seconde}}.$$

Le courant dans le circuit est mesuré à l'aide d'un appareil électrique appelé ampèremètre. Sa vue extérieure est montrée à la figure 23.

Les millièmes de l'ampère, les milliampères, sont mesurés à l'aide d'un milliampèremètre. Si la quantité d'électricité parcourant le conducteur varie, l'intensité de courant varie également.

Dans ce cas, la valeur moyenne du courant pour un intervalle de temps donné est déterminée d'après la formule:

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t},$$

où ΔQ est la variation de la quantité d'électricité;

Δt est la variation du temps.

Plus l'intervalle de temps Δt est petit, moins la valeur moyenne du courant différera de la valeur instantanée réelle du courant à l'instant donné.

Un courant qui s'écoule en sens unique et avec une intensité constante est appelé courant continu.

Les piles, les accumulateurs, les dynamos fournissent un courant continu lorsque les conditions de fonctionnement du circuit ne varient pas.

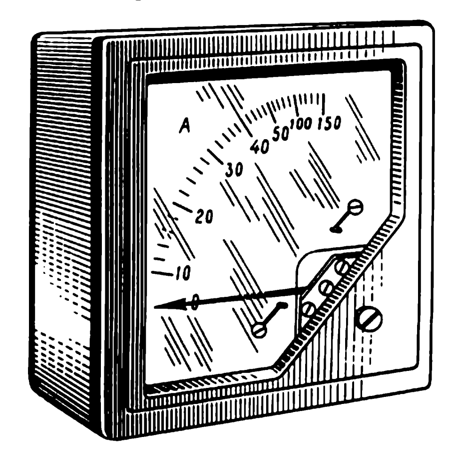


Fig. 23. Vue extérieure d'un ampèremètre

Le rapport de l'intensité de courant I à la section du conducteur S est appelé *densité de courant* et est désigné par la lettre grecque δ (delta):

$$\delta = \frac{I}{S}.$$

Puisqu'en général la section des conducteurs est donnée en mm^2, la densité de courant est mesurée en A/mm^2.

§ 19. RÉSISTANCE ET CONDUCTANCE DES CONDUCTEURS. VARIATION DE LA RÉSISTANCE EN FONCTION DES CONDITIONS PHYSIQUES

Lorsqu'un circuit électrique aux bornes duquel il existe une différence de potentiel est fermé, un courant électrique commence à circuler. Sous l'influence des forces électriques du champ, les électrons libres se déplacent le long du conducteur. En se déplaçant ils heurtent les atomes du conducteur et leur rendent la réserve d'énergie cinétique. La vitesse de mouvement des électrons varie continuellement:

elle diminue en cas de collision avec les atomes, molécules et autres électrons, puis augmente de nouveau sous l'effet du champ électrique et diminue lors de nouvelles collisions. Il en résulte dans les conducteurs un mouvement uniforme du flux d'électrons à une vitesse de quelques fractions de centimètre par seconde. Par conséquent, les électrons passant par le conducteur rencontrent toujours de sa part

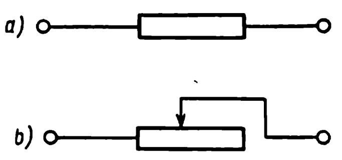


Fig. 24. Désignations conventionnelles des résistances électriques

une résistance à leur mouvement. Lors du passage d'un courant électrique par un conducteur, ce dernier s'échauffe.

On appelle résistance électrique d'un conducteur la propriété d'un corps ou d'un milieu de transformer l'énergie électrique en énergie thermique lorsque ce corps ou ce milieu est parcouru par un courant. La résistance est généralement désignée par la lettre r. Sur les schémas, la résistance électrique est désignée comme il est indiqué sur la figure 24, *a*.

Une résistance réglable servant à faire varier le courant dans un circuit est appelé *rhéostat*. Sur les schémas les rhéostats sont désignés comme l'indique la figure 24, *b*. Les rhéostats sont généralement fabriqués en fil métallique enroulé sur un support isolant. Le curseur ou le levier du rhéostat est mis dans une position déterminée, ce qui fait introduire la résistance requise dans le circuit.

Un long conducteur de faible section présente une grande résistance au passage du courant. Par contre, des conducteurs courts et de forte section opposent au courant une faible résistance.

Si l'on prend deux conducteurs de natures différentes mais ayant la même longueur et la même section, ces conducteurs opposeront au passage du courant des résistances différentes. Cela prouve que la résistance d'un conducteur dépend du matériau du conducteur.

La température du conducteur exerce aussi une influence sur sa résistance. Avec l'augmentation de la température, la résistance des métaux croît, tandis que celle

des liquides et du charbon diminue. Seuls quelques alliages spéciaux (manganine, constantan, nickéline, etc.) ne changent presque pas leur résistance avec la température.

On voit donc que la résistance électrique d'un conducteur dépend des facteurs suivants:

1) longueur du conducteur;
2) section du conducteur;
3) nature du conducteur;
4) température du conducteur.

On a adopté l'ohm comme unité de résistance. Il est souvent désigné par la lettre grecque Ω (oméga). Ainsi, au lieu d'écrire « la résistance du conducteur est égale à 15 ohms » on peut écrire simplement: $r = 15\ \Omega$.

Un *kilohm* (ou kΩ) vaut mille ohms.

Un *mégohm* (ou MΩ) vaut un million d'ohms.

Pour pouvoir comparer la résistance des conducteurs faits en différents matériaux, il faut prendre pour chaque échantillon une longueur et une section déterminées. On pourra alors juger quel matériau laisse mieux passer le courant électrique.

Tableau 1

Résistivité des différents conducteurs[1]

Matériau	Résistivité ρ en $\frac{\text{ohm}\cdot\text{mm}^2}{\text{m}}$
Argent	0,016
Cuivre	0,0175
Aluminium	0,03
Tungstène	0,05
Fer	0,13
Plomb	0,2
Nickéline (alliage de cuivre, de nickel et de zinc)	0,42
Manganine (alliage de cuivre, de nickel et de manganèse)	0,43
Constantan (alliage de cuivre, de nickel et d'aluminium)	0,5
Mercure	0,94
Nichrome (alliage de nickel, de chrome, de fer et de manganèse)	1,1

[1]) Voir la caractéristique détaillée des métaux et des alliages dans les tableaux 8 et 9.

La résistance en ohms d'un conducteur de 1 m de longueur et de 1 mm^2 de section est appelée *résistivité* et est désignée par la lettre grecque ρ (rhô). Le tableau 1 indique la résistivité de certains conducteurs.

On voit d'après ce tableau qu'un fil de fer de 1 m de long et de 1 mm^2 de section a une résistance de 0,13 ohm. Pour obtenir une résistance de 1 ohm, il faut prendre 7,7 m de ce fil. C'est l'argent qui a la plus faible résistivité. On peut obtenir une résistance de 1 ohm en prenant 62,5 m de fil d'argent de 1 mm^2 de section. L'argent est le meilleur conducteur, mais son prix élevé limite son emploi. En deuxième place, après l'argent, vient le cuivre: un fil de cuivre long de 1 m et de 1 mm^2 de section a une résistance de 0,0175 ohm. Pour obtenir une résistance de 1 ohm, il faut 57 m de ce fil.

Le cuivre chimiquement pur obtenu par affinage est employé pour la fabrication des fils, des câbles, des enroulements de machines électriques et d'appareils. On utilise aussi largement l'aluminium et le fer comme conducteurs électriques.

La résistance d'un conducteur peut être calculée par la formule:

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

où r est la résistance du conducteur en ohms;
ρ est la résistivité du conducteur;
l est sa longueur en mètres;
S est sa section en mm^2.

Exemple 1. Calculer la résistance d'un fil de fer de 200 m de long et de 5 mm^2 de section.

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0,13 \cdot 200}{5} = 5,2 \text{ ohms.}$$

Exemple 2. Calculer la résistance d'un fil d'aluminium de 2 km de long et de 2,5 mm^2 de section.

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0,03 \cdot 2000}{2,5} = 24 \text{ ohms.}$$

La formule de la résistance permet de trouver facilement la longueur, la résistivité ou la section d'un conducteur.

Exemple 3. On a besoin de confectionner une résistance de 30 ohms en fil de nickéline de 0,21 mm^2 de section. Déterminer la lon-

gueur requise du conducteur.

$$l=\frac{r\cdot S}{\rho}=\frac{30\cdot 0{,}21}{0{,}42}=15 \text{ m}.$$

Exemple 4. Calculer la section d'un fil de nichrome long de 20 m si l'on sait que sa résistance est de 25 ohms.

$$S=\frac{\rho\cdot l}{r}=\frac{1{,}1\cdot 20}{25}=0{,}88 \text{ mm}^2.$$

Exemple 5. Un fil de 40 m de long et de 0,5 mm² de section a une résistance de 16 ohms. Déterminer le matériau du fil.

Le matériau du conducteur est caractérisé par sa résistivité:

$$\rho=\frac{r\cdot S}{l}=\frac{16\cdot 0{,}5}{40}=0{,}2.$$

D'après le tableau des résistivités, on trouve qu'il s'agit du plomb.

Nous avons déjà indiqué que la résistance des conducteurs dépend de la température. Faisons l'expérience suivante. Enroulons en spirale un fil métallique fin de plusieurs mètres de long et branchons cette spirale aux bornes d'un accumulateur. Pour pouvoir mesurer l'intensité de courant insérons dans le circuit un ampèremètre. Lorsqu'on chauffe la spirale dans la flamme d'un bec de gaz on peut voir que les indications de l'ampèremètre diminuent. Cela prouve que la résistance du fil métallique augmente avec la température.

La résistance de certains métaux chauffés à 100 °C augmente de 40 à 50 %. Il existe des alliages qui changent faiblement leur résistance avec la température. Certains alliages spéciaux ne changent pratiquement pas leur résistance avec la température. La résistance des conducteurs métalliques croît avec la température, tandis que celle des électrolytes (conducteurs liquides), du charbon et de certains solides diminue.

La propriété des métaux de changer leur résistance avec la température est utilisée pour la construction des thermomètres à résistance. Un tel thermomètre est formé par un fil de platine enroulé sur une carcasse en mica. En plaçant ce thermomètre, par exemple, dans un four et en mesurant la résistance du fil de platine avant et après l'échauffement, on peut déterminer la température dans le four.

La variation de la résistance d'un conducteur lors de son échauffement par ohm de résistance initiale et par

degré de température est appelée *coefficient de température de résistance* et est désignée par la lettre α.

Si à une température t_0, la résistance d'un conducteur est égale à r_0 et à une température t, elle est r_t, le coefficient de température de résistance peut être déterminé par la formule :

$$\alpha = \frac{r_t - r_0}{r_0 (t - t_0)} .$$

N o t e. Cette formule n'est valable que pour une certaine plage de température (jusqu'à 200 °C, environ).

Le tableau 2 indique les valeurs du coefficient de température de résistance α pour certains métaux.

Tableau 2

Valeurs du coefficient de température de résistance de certains métaux

Métal	α	Métal	α
Argent	0,0035	Mercure	0,0090
Cuivre	0,0040	Nickéline	0,0003
Fer	0,0066	Constantan . . .	0,000005
Tungstène	0,0045	Nichrome	0,00016
Platine	0,0032	Manganèse	0,00005

La formule donnant le coefficient de température permet de déterminer r_t :

$$r_t = r_0 [1 \pm \alpha (t - t_0)].$$

Exemple 6. Calculer la résistance d'un fil de fer chauffé à 200° C, si sa résistance à 0 °C était de 100 ohms.

$$r_t = r_0 [1 + \alpha (t - t_0)] = 100 (1 + 0,0066 \cdot 200) = 232 \text{ ohms}.$$

Exemple 7. Un thermomètre à résistance fabriqué en fil de platine avait dans un local où la température était de 15 °C une résistance de 20 ohms. Ensuite, il a été placé dans un four et, au bout d'un certain temps, sa résistance était de 29,6 ohms. Déterminer la température du four.

$$t = \frac{r_t - r_0}{r_0 \alpha} + t_0 = \frac{29,6 - 20}{20 \cdot 0,0032} + 15 = 165 \text{ °C}.$$

Jusqu'à présent nous avons considéré la résistance d'un conducteur comme un obstacle au passage du courant élec-

trique. Mais le courant circule dans le conducteur. Par conséquent, en plus de sa résistance un conducteur possède également la propriété de faire passer un courant électrique, c'est-à-dire une conductance.

Plus la résistance d'un conducteur est grande plus sa conductance est petite et inversement, plus la résistance d'un conducteur est petite plus sa conductance est grande. Pour cette raison, la résistance et la conductance d'un conducteur sont des grandeurs inverses.

Puisqu'on désigne la résistance d'un conducteur par r, sa conductance sera donc $\frac{1}{r}$. Généralement, la conductance est désignée par la lettre G.

La conductance électrique est mesurée en $\frac{1}{\text{ohm}}$ ou en siemens.

Exemple 8. La résistance d'un conducteur est de 20 ohms. Calculer sa conductance. Si $r = 20$ ohms, on a

$$G = \frac{1}{r} = \frac{1}{20} = 0{,}05 \frac{1}{\text{ohm}}.$$

Exemple 9. La conductance d'un conducteur est de $0{,}1 \frac{1}{\text{ohm}}$. Calculer sa résistance.

$$\text{Si } G = 0{,}1 \frac{1}{\text{ohm}}, \quad \text{on a} \quad r = \frac{1}{0{,}1} = 10 \text{ ohms}.$$

§ 20. FORCE ÉLECTROMOTRICE D'UN GÉNÉRATEUR. TENSION

Pour que le courant électrique circule dans un circuit de façon continue, il faut maintenir une différence de potentiel aux bornes du générateur. D'une manière analogue si l'on réunit par un tuyau deux récipients aux niveaux d'eau différents, il y aura circulation d'eau d'un récipient à l'autre jusqu'au moment où les niveaux s'égalisent. En rajoutant sans cesse de l'eau dans un récipient et en l'évacuant de l'autre, on peut obtenir un mouvement continu de l'eau dans le tuyau.

Lors du travail d'un générateur, les électrons passent de l'anode à la cathode.

On en déduit qu'à l'intérieur du générateur agit une force devant maintenir de façon continue le courant dans le circuit, autrement dit, assurer le travail du générateur.

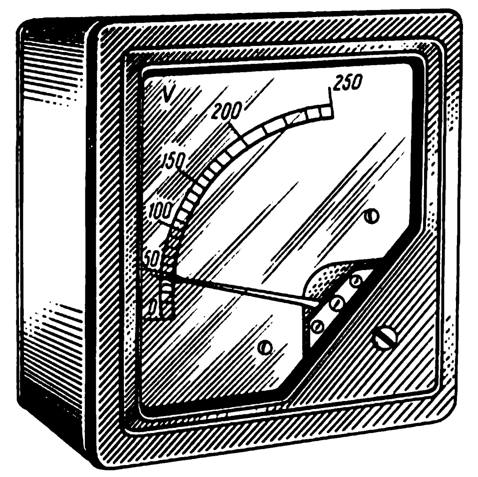


Fig. 25. Vue extérieure d'un voltmètre

On appelle *force électromotrice* (F.É.M.) désignée par la lettre E la cause qui établit et maintient une différence de

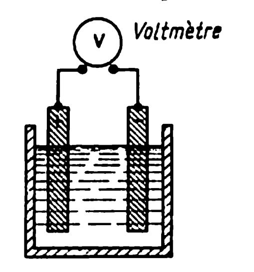


Fig. 26. Mesure de la force électromotrice d'une pile avec un voltmètre

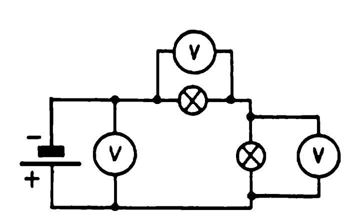


Fig. 27. Mesure des tensions dans les différentes portions d'un circuit électrique avec un voltmètre

potentiel, crée un courant dans le circuit, en surmontant les résistances externe et interne.

La force électromotrice des générateurs apparaît sous l'influence des causes qui sont spécifiques pour chaque type de générateur.

Dans les sources de tension chimiques (piles, accumulateurs) la F.É.M. est obtenue grâce aux réactions chimiques, dans les machines génératrices, elle apparaît grâce à l'induction électromagnétique, dans les couples thermoélectriques grâce à l'énergie thermique, etc.

La différence de potentiel qui provoque le passage du courant par la résistance d'une portion de circuit électrique est appelée tension entre les extrémités de cette portion. La force électromotrice et la tension sont mesurées en volts. Pour mesurer la F.É.M. et la tension on utilise des voltmètres (fig. 25).

Les millièmes de volt (millivolts) sont mesurés à l'aide d'un millivoltmètre, les milliers de volts (kilovolts) sont mesurés à l'aide d'un kilovoltmètre.

Pour mesurer la F.É.M. d'un générateur il faut brancher le voltmètre à ses bornes, le circuit extérieur étant ouvert (fig. 26). Pour mesurer la tension dans une portion de circuit électrique, il faut brancher le voltmètre aux extrémités de cette portion (fig. 27).

§ 21. LOI D'OHM

Montons un circuit électrique (fig. 28, *a*) comprenant un accumulateur *1* de 2 volts, un rhéostat à levier *2*, deux appareils de mesure dont un voltmètre *3* et un ampèremètre *4* et des fils de connexion *5*. En utilisant le rhéostat, réglons à 2 ohms la résistance de ce circuit. Le voltmètre branché aux bornes de l'accumulateur indiquera une tension de 2 volts et l'ampèremètre connecté en série indiquera un courant de 1 A. Augmentons la tension jusqu'à 4 volts en branchant un autre accumulateur (fig. 28, *b*). Pour la même résistance du circuit égale à 2 ohms, l'ampèremètre indiquera un courant de 2 ampères. Un accumulateur de 6 volts provoquera une indication de l'ampèremètre égale à 3 A (fig. 28, *c*). Inscrivons les résultats obtenus dans le tableau 3.

Tableau 3

Variation du courant en fonction de la tension pour une résistance constante

Tension du circuit, V	Résistance du circuit, ohms	Courant dans circuit, A
2	2	1
4	2	2
6	2	3

On peut en déduire que, la résistance étant constante, le courant dans le circuit est d'autant plus intense que la tension est plus grande et que le courant augmente dans le même rapport que la tension.

Dans le même circuit, montons un accumulateur de 2 volts et à l'aide du rhéostat réglons une résistance égale

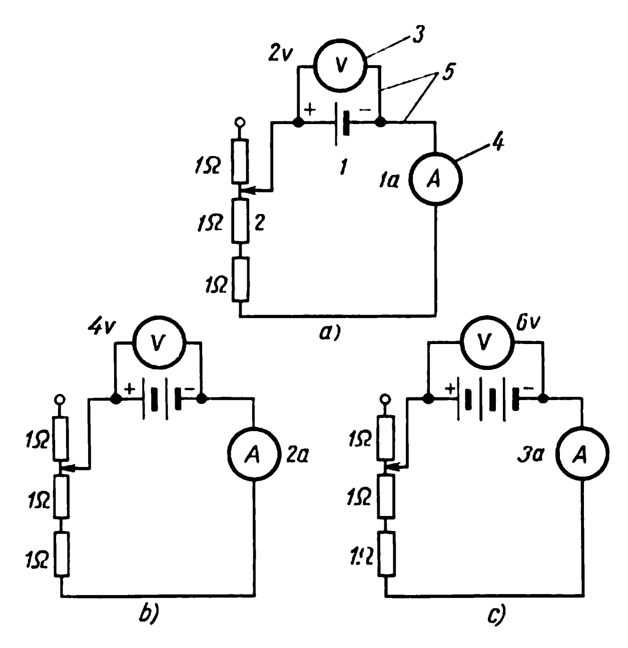


Fig. 28. Variation du courant dans un circuit électrique par variation de la tension pour une résistance constante

à 1 ohm (fig. 29, *a*). L'ampèremètre indiquera alors 2 ampères. A l'aide du rhéostat, augmentons la résistance jusqu'à 2 ohms (fig. 29, *b*). L'indication de l'ampèremètre (la tension du circuit restant la même) sera de 1 ampère.

Lorsque la résistance du circuit est de 3 ohms (fig. 29, *c*), l'ampèremètre indiquera $\frac{2}{3}$ A.

Les résultats de l'expérience sont consignés dans le tableau 4.

Il en résulte que, la tension étant constante, le courant dans le circuit est d'autant plus intense que la résistance du

Tableau 4

Variation du courant en fonction de la résistance, pour une tension constante

Tension, V	Résistance du circuit, ohms	Courant dans le circuit, A
2	1	2
2	2	1
2	3	2/3

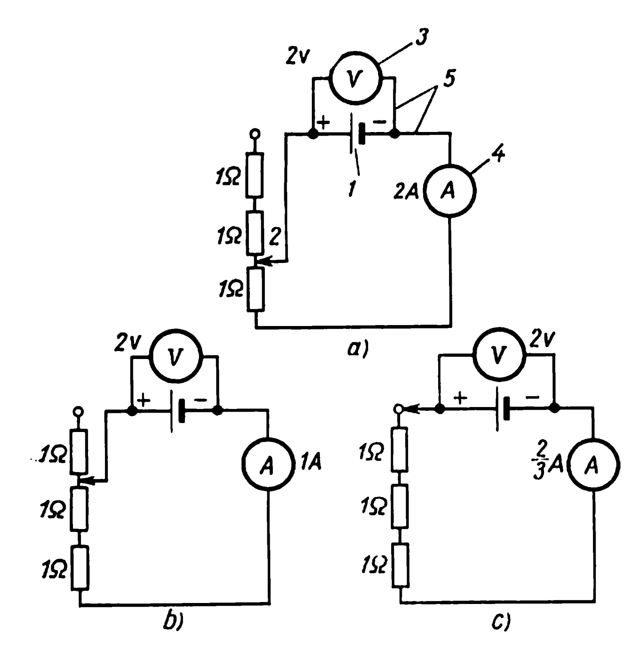


Fig. 29. Variation du courant dans un circuit électrique par variation de la résistance pour une tension constante

circuit est plus petite et le courant augmente en raison inverse de la résistance.

L'expérience montre que le *courant dans une portion de circuit est proportionnel à la tension appliquée à cette portion et inversement proportionnel à sa résistance.* Cette relation est connue sous le nom de la loi d'Ohm.

Si I désigne le courant en ampères, U la tension en volts, r la résistance en ohms, la loi d'Ohm peut être exprimée par la formule :

$$I = \frac{U}{r} .$$

Cela signifie que le courant dans cette portion de circuit est égal à la tension appliquée divisée par la résistance de cette portion.

Exemple 10. Calculer l'intensité du courant qui circulera dans le filament d'une lampe à incandescence si ce filament a une résistance fixe de 240 ohms et la lampe est branchée sur le secteur dont la tension est de 120 V.

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120}{240} = 0{,}5\ A.$$

En utilisant la formule de la loi d'Ohm on peut déterminer également la tension et la résistance du circuit.

$$U = I \cdot r,$$

donc, la tension appliquée à une portion de circuit est égale au produit du courant par la résistance et

$$r = \frac{U}{I} ,$$

c'est-à-dire que la résistance du circuit est égale à la tension divisée par le courant qui circule dans ce circuit.

Exemple 11. Quelle tension doit-on appliquer pour qu'un circuit ayant une résistance de 6 ohms soit parcouru par un courant de 20 A ?

$$U = I \cdot r = 20 \cdot 6 = 120\ \text{V}.$$

Exemple 12. La spirale d'un réchaud électrique est parcourue par un courant de 5 A. Le réchaud est branché sur le secteur de 220 V. Déterminer la résistance de la spirale du réchaud.

$$r = \frac{U}{I} = \frac{220}{5} = 44\ \text{ohms}.$$

Si dans la formule $U = I \cdot r$ le courant est de 1 A et la résistance est de 1 ohm, la tension sera égale à 1 volt :

$$1V = 1A \cdot 1\ \text{ohm}.$$

On en déduit : la tension de 1 V agit dans un circuit dont la résistance est de 1 ohm et le courant de 1 A.

La figure 30 représente un circuit électrique comprenant un accumulateur, une résistance *r* et de longs fils de connexion présentant une certaine résistance.

Comme on le voit sur cette figure, le voltmètre connecté aux bornes de l'accumulateur indique une tension de 2 V. Au milieu de la ligne, le voltmètre n'indique que 1,9 V

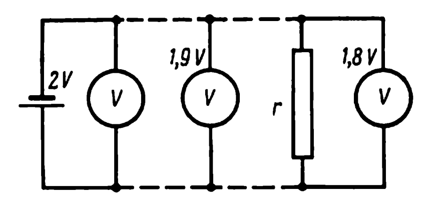


Fig. 30. Chute de tension le long d'un circuit électrique

et près de la résistance *r* la tension ne dépasse pas 1,8 V. Une telle diminution de la tension le long du circuit entre les différents points de ce dernier est appelée *chute de tension*.

La chute de tension le long d'un circuit électrique est due au fait qu'une partie de la tension appliquée est dépensée pour surmonter la résistance du circuit. La chute de tension dans une portion de circuit sera d'autant plus grande que le courant est plus fort et que la résistance de la portion est plus élevée. La loi d'Ohm appliquée à une portion de circuit montre que la chute de tension (en volts) dans une portion de circuit est égale au courant (en ampères) parcourant cette portion multiplié par la résistance (en ohms) de la même portion:

$$U = I \cdot r.$$

Exemple 13. Une génératrice dont la tension aux bornes est de 115 V alimente un moteur connecté par des fils dont la résistance est de 0,1 ohm. Calculer la tension aux bornes du moteur s'il absorbe un courant de 50 A.

Il est évident que la tension aux bornes du moteur sera inférieure à celle qu'on a aux bornes de la génératrice, car il y aura une certaine chute de tension dans la ligne. D'après la formule

$$U = I \cdot r = 50 \cdot 0{,}1 = 5 \text{ V}.$$

Si la chute de tension dans la ligne est de 5 V, la tension aux bornes du moteur sera 115 — 5 = 110 V.

Exemple 14. Une génératrice fournit une tension de 240 V. L'énergie est transmise par une ligne à deux fils de cuivre de 350 m de longueur et de 10 mm² de section vers un moteur absorbant un courant de 15 A. Calculer la tension aux bornes du moteur.

La tension aux bornes du moteur sera inférieure à la tension de la génératrice, la différence étant égale à la chute de tension dans la ligne. La chute de tension dans la ligne $U = I \cdot r$.

Vu que la résistance r des fils est inconnue, nous allons la calculer d'après la formule:

$$r=\frac{\rho \cdot l}{S}=\frac{0{,}0175 \cdot 700}{10}=1{,}22 \text{ ohm}$$

(la longueur l est égale à 700 m, car le courant va de la génératrice au moteur et puis revient à la génératrice).

En introduisant r dans la formule, on obtient:

$$U=I \cdot r=15 \cdot 1{,}22=18{,}3 \text{ V}.$$

La tension aux bornes du moteur sera donc $240 - 18{,}3 = 221{,}7$ V.

Exemple 15. Calculer la section des fils d'aluminium qu'on doit utiliser pour amener de l'énergie électrique à un moteur fonctionnant sous la tension de 120 V et absorbant un courant de 20 A. L'énergie sera fournie par une génératrice de 127 V et transmise par une ligne longue de 150 m.

Déterminons la chute de tension admissible:

$$127-120=7 \text{ V}.$$

La résistance des fils de la ligne doit être:

$$r=\frac{U}{I}=\frac{7}{20}=0{,}35 \text{ ohm}.$$

A l'aide de la formule

$$r=\frac{\rho \cdot l}{S}$$

calculons la section du fil:

$$S=\frac{\rho \cdot l}{r}=\frac{0{,}03 \cdot 300}{0{,}35}=25{,}7 \text{ mm}^2.$$

En consultant l'aide-mémoire on choisit un fil de 25 mm² de section.

La section de la même ligne, faite en fil de cuivre, sera:

$$S=\frac{\rho \cdot l}{r}=\frac{0{,}0175 \cdot 300}{0{,}35}=15 \text{ mm}^2.$$

Dans ce cas on choisit un fil de 16 mm² de section.

Notons que parfois on est obligé à adopter une chute de tension pour diminuer la valeur de la tension appliquée.

Exemple 16. Pour un fonctionnement stable d'un arc électrique il faut un courant de 10 A sous la tension de 40 V. Calculer la résistance additionnelle qui doit être branchée en série avec l'arc pour pouvoir alimenter ce dernier depuis un réseau de 120 V.

La chute de tension dans la résistance additionnelle sera

$$120-40=80 \text{ V}.$$

Connaissant la chute de tension dans la résistance additionnelle et le courant qui la parcourt, on peut d'après la loi d'Ohm pour une portion de circuit déterminer la valeur de cette résistance:

$$r=\frac{U}{I}=\frac{80}{10}=8 \text{ ohms}.$$

Jusqu'à présent, en examinant les circuits électriques, nous n'avons pas tenu compte du fait que le courant passe non seulement par la partie externe du circuit, mais aussi par sa partie interne, c'est-à-dire à l'intérieur de la pile, de l'accumulateur ou d'un autre générateur.

En passant par la partie interne du circuit, le courant électrique doit également surmonter sa résistance et pour cette raison une chute de tension se produit aussi à l'intérieur du générateur.

Ainsi, la force électromotrice (F.É.M.) du générateur compense les chutes de tension extérieure et intérieure dans le circuit.

Si E est la force électromotrice en volts, I le courant en ampères, r la résistance de la partie externe du circuit en ohms, r_0 la résistance de la partie interne du circuit en ohms, U_0 la chute de tension interne et U la chute de tension externe, on obtient:

$$E=U_0+U=I\cdot r_0+I\cdot r=I\,(r_0+r),$$

$$I=\frac{E}{r_0+r}.$$

C'est la loi d'Ohm pour le circuit entier. Cette loi s'énonce ainsi: *le courant dans un circuit électrique est égal à la force électromotrice divisée par la résistance totale du circuit (somme des résistances interne et externe).*

Exemple 17. La force électromotrice E d'une pile est égale à 1,5 V, sa résistance interne $r_0 = 0{,}3$ ohm. La pile débite dans une résistance $r = 2{,}7$ ohms. Calculer l'intensité de courant dans le circuit.

$$I=\frac{E}{r_0+r}=\frac{1{,}5}{0{,}3+2{,}7}=0{,}5 \text{ A}.$$

Exemple 18. Déterminer la F.É.M. d'une pile dont les bornes sont connectées à une résistance $r = 2$ ohms, si le courant dans le circuit $I = 0{,}6$ A. La résistance interne de la pile $r_0 = 0{,}5$ ohm.

Un voltmètre branché aux bornes de la pile indiquera une tension égale à la tension du réseau ou à la chute de tension dans le circuit extérieur.

$$U = I \cdot r = 0{,}6 \cdot 2 = 1{,}2 \text{ V}.$$

Il en résulte qu'une partie de la force électromotrice de la pile est utilisée pour compenser les pertes intérieures et l'autre égale à 1,2 V est fournie au réseau.

La chute de tension interne:

$$U_0 = I \cdot r_0 = 0{,}6 \cdot 0{,}5 = 0{,}3 \text{ V}.$$

Puisque $E = U_0 + U$, on a:

$$E = 0{,}3 \text{ V} + 1{,}2 \text{ V} = 1{,}5 \text{ V}.$$

On peut obtenir la même réponse en se servant de la loi d'Ohm pour le circuit entier:

$$I = \frac{E}{r_0 + r}$$

d'où

$$E = I\,(r_0 + r) = 0{,}6\,(0{,}5 + 2) = 1{,}5 \text{ V}.$$

Un voltmètre connecté aux bornes d'un générateur quelconque en marche indique la tension à ces bornes ou la tension du réseau. Lorsqu'on ouvre le circuit, le courant dans ce circuit cesse. Le courant ne passera non plus par le générateur et, par conséquent, il n'y aura pas de chute de tension interne. Pour cette raison, à circuit ouvert, le voltmètre indique la F.É.M. du générateur.

Ainsi, un voltmètre branché aux bornes du générateur indique:

a) la tension du réseau, lorsque le circuit électrique est fermé,

b) la F.É.M. du générateur, lorsque le circuit électrique est ouvert.

Exemple 19. La force électromotrice d'une pile est égale à 1,8 V. Aux bornes de cette pile est connectée une résistance $r = 2{,}7$ ohms. Le courant dans le circuit est égal à 0,5 A. Calculer la résistance interne r_0 de la pile et la chute de tension interne U_0.

$$r_0 + r = \frac{E}{I} = \frac{1{,}8}{0{,}5} = 3{,}6 \text{ ohms}.$$

Puisque $r = 2{,}7$ ohms, on a:

$$r_0 = 3{,}6 - 2{,}7 = 0{,}9 \text{ ohm};$$

$$U_0 = I \cdot r_0 = 0{,}5 \cdot 0{,}9 = 0{,}45 \text{ V}.$$

Ces exemples montrent qu'un voltmètre branché aux bornes du générateur n'indique pas la même tension pour les différentes conditions de travail du circuit électrique. Si le courant dans le circuit augmente, la chute de tension interne augmente également et pour cette raison, la F.É.M. étant constante, le circuit extérieur recevra une tension de plus en plus petite.

Le tableau 5 montre comment varie la tension (U) d'un circuit électrique en fonction de la résistance externe (r), la F.É.M. (E) et la résistance interne (r_0) du générateur étant constantes.

Tableau 5

Variation de la tension en fonction de la résistance r, la F. É. M. et la résistance interne r_0 étant constantes

E	r_0	r	$I = \frac{E}{r_0 + r}$	$U_0 = I \cdot r_0$	$U = I \cdot r$
2	0,5	2	0,8	0,4	1,6
2	0,5	1	1,33	0,67	1,33
2	0,5	0,5	2	1	1

§ 22. CONNEXIONS DE RÉSISTANCES. PREMIÈRE LOI DE KIRCHHOFF

Les conducteurs d'un circuit électrique peuvent être connectés en série, en parallèle et de façon mixte.

Connexion série. On appelle connexion ou montage série une connexion où la fin du premier conducteur

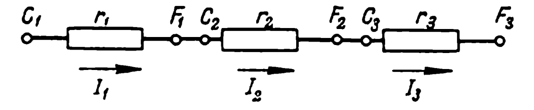


Fig. 31. Montage des résistances en série

est réunie au commencement du deuxième conducteur, la fin du deuxième conducteur est réunie au commencement du troisième, etc. (fig. 31).

La résistance globale d'un circuit comprenant plusieurs conducteurs montés en série est égale à la somme des résistances des conducteurs individuels:

$$r = r_1 + r_2 + r_3 + \ldots + r_n.$$

Le courant dans les différentes portions d'un circuit comprenant des conducteurs en série est partout le même :

$$I_1 = I_2 = I_3 = I.$$

Exemple 20. La figure 32 montre un circuit électrique comprenant trois résistances connectées en série $r_1 = 2$ ohms, $r_2 = 3$ ohms, $r_3 = 5$ ohms. Quelles seront les indications des voltmètres V_1, V_2, V_3 et V_4, si le courant dans le circuit est égal à 4 A ?

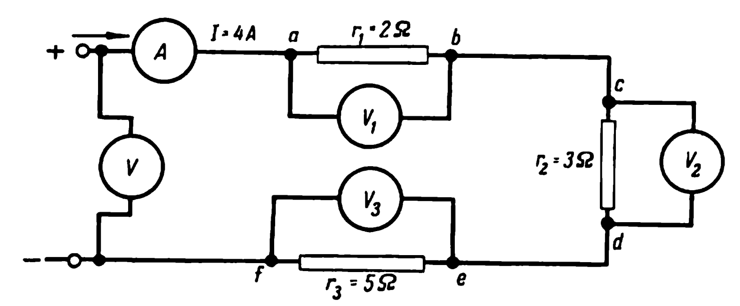


Fig. 32. Montage pour mesurer les tensions dans les différentes portions d'un circuit électrique

La résistance globale du circuit :

$$r = r_1 + r_2 + r_3 = 2 + 3 + 5 = 10 \text{ ohms}.$$

D'après la loi d'Ohm, la tension aux bornes du circuit est égale au produit du courant dans le circuit et de sa résistance :

$$U = I \cdot r = 4 \cdot 10 = 40 \text{ V}.$$

Le voltmètre V connecté aux bornes de la source de tension indiquera donc une tension de 40 V.

Dans la résistance r_1 le courant produit une chute de tension :

$$U_1 = I \cdot r_1 = 4 \cdot 2 = 8 \text{ V}.$$

Le voltmètre V_1 branché entre les points a et b indiquera une tension de 8 V.

La chute de tension dans la résistance r_2 :

$$U_2 = I \cdot r_2 = 4 \cdot 3 = 12 \text{ V}.$$

Le voltmètre V_2 branché entre les points c et d indiquera une tension de 12 volts.

La chute de tension dans la résistance r_3 :

$$U_3 = I \cdot r_3 = 4 \cdot 5 = 20 \text{ V}.$$

Le voltmètre V_3 branché entre les points e et f indiquera 20 volts.

Si on connecte une borne du voltmètre au point a et l'autre au point d, le voltmètre indiquera une différence de potentiel égale

à la somme des chutes de tension dans les résistances r_1 et r_2 ($8+12=20$ V).

Ainsi, le voltmètre V branché entre les points a et f et mesurant la tension aux bornes du circuit indiquera la différence de potentiel entre ces points ou la somme des chutes de tension dans les résistances r_1, r_2 et r_3. On voit donc que la somme des chutes de tension dans les portions du circuit électrique est égale à la tension aux bornes du circuit.

Puisque dans un montage en série le courant dans toutes les portions du circuit a la même valeur, la chute de tension est proportionnelle à la résistance de la portion donnée.

Exemple 21. Trois résistances de 10, 15 et 20 ohms sont connectées en série comme il est indiqué sur la figure 33. Le courant dans le circuit est de 5 A. Calculer la chute de tension dans chaque résistance.

$$U_1=I\cdot r_1=5\cdot 10=50 \text{ V};$$

$$U_2=I\cdot r_2=5\cdot 15=75 \text{ V};$$

$$U_3=I\cdot r_3=5\cdot 20=100 \text{ V}.$$

La tension totale aux bornes du circuit est égale à la somme des chutes de tension dans les portions du circuit :

$$U=U_1+U_2+U_3=50+75+100=225 \text{ V}.$$

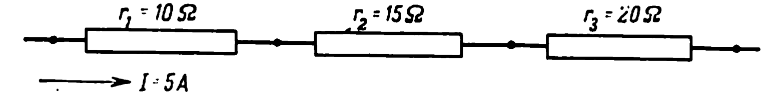


Fig. 33. Dessin pour l'exemple 21

Connexion parallèle. C'est un montage où les commencements de tous les conducteurs sont réunis dans un seul et même point et les fins des conducteurs sont réunies dans un autre point (fig. 34). Le commencement du circuit est connecté à un pôle de la source de tension et la fin du circuit à l'autre pôle.

La figure montre que dans ce cas le courant passe par plusieurs voies. En passant par le point de bifurcation A, le courant circule ensuite par trois résistances et est égal à la somme des courants partant de ce point :

$$I=I_1+I_2+I_3.$$

Si, par convention, on suppose que les courants se dirigeant vers un point de bifurcation (un nœud) sont positifs

et ceux qui s'en éloignent — négatifs, on peut écrire alors pour le point de bifurcation :

$$\sum_{k=1}^{k=n} I_k = 0.$$

Autrement dit, *la somme algébrique des intensités des courants passant par un nœud est toujours nulle. Cette relation entre les courants passant par un point de dérivation du circuit est appelée première loi de Kirchhoff.* Généralement, lors du calcul des circuits électriques, les sens des courants dans

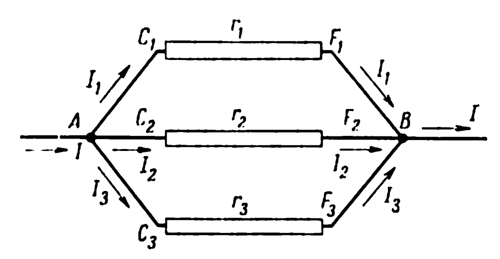


Fig. 34. Montage des résistances en parallèle

les différentes branches connectées à un nœud quelconque sont inconnus. Pour cette raison, afin de pouvoir écrire l'équation de la première loi de Kirchhoff, il faut avant de commencer le calcul du circuit choisir d'une façon arbitraire dans toutes les branches du circuit les sens des courants positifs en les désignant par des flèches sur le schéma.

La loi d'Ohm permet de déduire la formule pour le calcul de la résistance équivalente des récepteurs montés en parallèle.

Le courant total se dirigeant vers le point A :

$$I = \frac{U}{r}.$$

Les courants dans les différentes branches ont respectivement les valeurs suivantes :

$$I_1 = \frac{U}{r_1}; \quad I_2 = \frac{U}{r_2}; \quad I_3 = \frac{U}{r_3}.$$

D'après la première loi de Kirchhoff on a :

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

ou

$$\frac{U}{r} = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2} + \frac{U}{r_3}.$$

En mettant U en facteur, on peut écrire :

$$\frac{U}{r}=U\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}+\frac{1}{r_3}\right).$$

En divisant par U les deux membres de l'égalité, on obtient la formule pour le calcul de la conductance totale :

$$\frac{1}{r}=\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}+\frac{1}{r_3}$$

ou :

$$G=G_1+G_2+G_3.$$

Donc, dans un montage en parallèle, c'est la conductance totale qui augmente et non la résistance.

Exemple 22. Calculer la résistance équivalente de trois résistances $r_1=2$ ohms, $r_2=3$ ohms, $r_3=4$ ohms branchées en parallèle.

$$G=G_1+G_2+G_3=\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+\frac{1}{4}=\frac{6+4+3}{12}=\frac{13}{12}\frac{1}{\text{ohm}},$$

d'où :

$$r=\frac{12}{13}=0{,}92 \text{ ohm}.$$

Exemple 23. Cinq résistances de 15, 20, 30, 40 et 60 ohms sont associées en parallèle. Calculer la résistance équivalente.

$$G=G_1+G_2+G_3+G_4+G_5=\frac{1}{15}+\frac{1}{20}+\frac{1}{30}+\frac{1}{40}+\frac{1}{60}=$$

$$=\frac{8+6+4+3+2}{120}=\frac{23}{120}\frac{1}{\text{ohm}},$$

d'où :

$$r=\frac{120}{23}=5{,}2 \text{ ohms}.$$

Il est à noter que la résistance équivalente est toujours plus petite que la plus faible des résistances associées en parallèle.

Si les résistances associées en parallèle ont la même valeur, la résistance équivalente r du circuit est égale à la résistance r_1 d'une des branches divisée par le nombre de branches n :

$$r=\frac{r_1}{n}.$$

Exemple 24. Calculer la résistance équivalente de quatre résistances de 20 ohms chacune branchées en parallèle :

$$r=\frac{r_1}{n}=\frac{20}{4}=5 \text{ ohms.}$$

Pour vérifier, calculons la résistance équivalente d'après la formule :

$$G=G_1+G_2+G_3+G_4=\frac{1}{20}+\frac{1}{20}+\frac{1}{20}+\frac{1}{20}=\frac{4}{20}\frac{1}{\text{ohm}},$$

d'où :

$$r=\frac{20}{4}=5 \text{ ohms.}$$

On voit que la réponse est identique à celle trouvée précédemment.

Exemple 25. Déterminer les courants dans les différentes branches connectées en parallèle comme l'indique la figure 35, *a*.

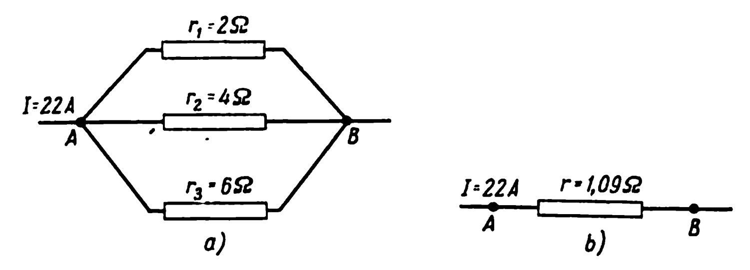


Fig. 35. Dessin pour l'exemple 25

Calculons la résistance équivalente :

$$G=G_1+G_2+G_3=\frac{1}{2}+\frac{1}{4}+\frac{1}{6}=\frac{6+3+2}{12}=\frac{11}{12}\frac{1}{\text{ohm}},$$

d'où :

$$r=\frac{12}{11}=1{,}09 \text{ ohm.}$$

Maintenant, pour simplifier nous pouvons présenter toutes les dérivations comme une seule résistance (fig. 35, *b*).

La chute de tension dans la portion entre les points A et B sera :

$$U=I\cdot r=22\cdot 1{,}09=24 \text{ V.}$$

En s'adressant de nouveau à la figure 35, *a* on voit que les trois résistances se trouvent sous la tension de 24 V, étant branchées entre les points A et B.

Dans la première branche, où la résistance $r_1 = 2$ ohms, la tension appliquée est de 24 V. D'après la loi d'Ohm, le courant dans cette portion du circuit est:

$$I_1 = \frac{U}{r_1} = \frac{24}{2} = 12 \text{ A}.$$

Le courant dans la deuxième branche:

$$I_2 = \frac{U}{r_2} = \frac{24}{4} = 6 \text{ A}.$$

Le courant dans la troisième branche:

$$I_3 = \frac{U}{r_3} = \frac{24}{6} = 4 \text{ A}.$$

La première loi de Kirchhoff donne la vérification des résultats obtenus:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 12 + 6 + 4 = 22 \text{ A}.$$

Le problème a été résolu correctement.

La répartition des courants dans les différentes branches est la suivante:

Première branche: $r_1 = 2$ ohms, $I_1 = 12$ A.
Deuxième branche: $r_2 = 4$ ohms, $I_2 = 6$ A.
Troisième branche: $r_3 = 6$ ohms, $I_3 = 4$ A.

On voit que la résistance de la première branche est deux fois inférieure à celle de la deuxième et le courant dans la première branche est deux fois supérieur à celui de la deuxième. La résistance de la troisième branche est trois fois supérieure à celle de la première, et le courant de la troisième branche est trois fois inférieur à celui de la première.

On peut en déduire que dans un montage en parallèle les courants dans les branches sont inversement proportionnels aux résistances respectives de ces branches. Ainsi, dans une branche à grande résistance circulera un courant plus faible que dans une branche à petite résistance.

Pour deux branches parallèles on peut évidemment utiliser la formule indiquée plus haut.

Mais il est plus facile dans ce cas de calculer la résistance équivalente en utilisant la formule:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{r_1 + r_2}{r_1 r_2}$$

ou définitivement:

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

C o n n e x i o n   m i x t e. C'est un montage où les conducteurs sont groupés en série et en parallèle. Un exemple de ce montage est indiqué à la figure 36.

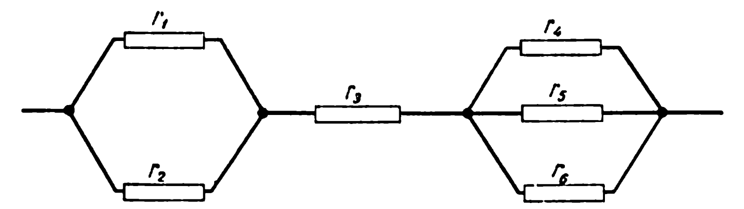


Fig. 36. Montage mixte des résistances

Exemple 26. Trouver la résistance équivalente du montage mixte représenté par la figure 36, où :

$$r_1=2 \text{ ohms}, \quad r_2=3 \text{ ohms}, \quad r_3=5 \text{ ohms}, \quad r_4=4 \text{ ohms}$$

$$r_5=8 \text{ ohms} \quad \text{et} \quad r_6=6 \text{ ohms}.$$

Déterminons la résistance équivalente de la première association :

$$G_{1,2}=G_1+G_2=\frac{1}{2}+\frac{1}{3}=\frac{3+2}{6}=\frac{5}{6}\,\frac{1}{\text{ohm}},$$

d'où :

$$r_{1,2}=\frac{6}{5}=1{,}2 \text{ ohm}.$$

La résistance équivalente de la seconde association :

$$G_{4,5,6}=G_4+G_5+G_6=\frac{1}{4}+\frac{1}{8}+\frac{1}{6}=\frac{6+3+4}{24}=\frac{13}{24}\,\frac{1}{\text{ohm}},$$

d'où :

$$r_{4,5,6}=\frac{24}{13}=1{,}85 \text{ ohm}.$$

La résistance équivalente du circuit :

$$r=r_{1,2}+r_3+r_{4,5,6}=1{,}2+5+1{,}85=8{,}05 \text{ ohms}.$$

§ 23. TRAVAIL ET PUISSANCE D'UN COURANT ÉLECTRIQUE

Soit U la tension continue appliquée au circuit représenté sur la figure 37.

$$U=\varphi_A-\varphi_B.$$

Pendant le temps t, le circuit a été traversé par une quantité d'électricité Q. Les forces du champ électrique

agissant le long du conducteur ont transporté pendant ce temps la charge Q du point A au point B. Le travail des forces électriques du champ ou, ce qui revient au même, le travail du courant électrique peut être calculé suivant la formule:

$$A = Q(\varphi_A - \varphi_B) = Q \cdot U,$$

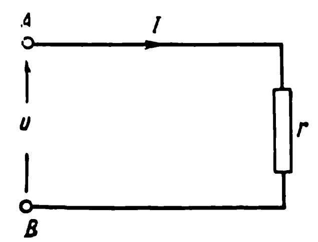


Fig. 37. Travail et puissance d'un courant électrique

mais, puisque $Q = It$, on a définitivement:

$$A = UIt,$$

où A est le travail en joules;
I est l'intensité de courant en ampères;
t est le temps en secondes;
U est la tension en volts.

D'après la loi d'Ohm: $U = I \cdot r$. On peut donc écrire la formule exprimant le travail sous la forme suivante:

$$A = I^2rt,$$

Le travail effectué en une unité de temps est appelé *puissance* et est désigné par la lettre P.

$$P = \frac{A}{t}.$$

On a donc:

$$A = Pt.$$

L'unité de puissance:

$$\frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ seconde}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \text{ watt (W)}.$$

En introduisant dans la formule de la puissance l'expression pour le travail du courant électrique, on obtient :

$$P = \frac{UIt}{t} = UI;$$

$$P = UI \text{ W}$$

ou

$$P = \frac{I^2rt}{t} = I^2r; \quad P = I^2r \text{ W}.$$

On utilise également des unités de puissance majeures:
100 W = 1 hectowatt (hW).
1000 W = 1 kilowatt (kW).
1 000 000 W = 1 mégawatt (MW).

La puissance électrique est mesurée à l'aide d'un wattmètre, comportant deux enroulements: un enroulement

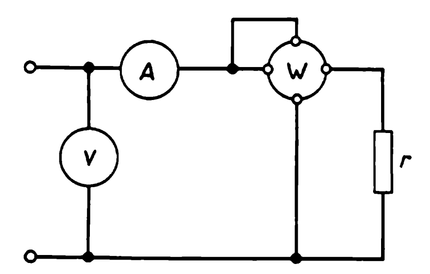


Fig. 38. Schéma de branchement d'un wattmètre

série et un enroulement parallèle. Le schéma de branchement d'un wattmètre est représenté par la figure 38.

La formule $P = IU$ montre que la puissance absorbée dans un réseau peut être calculée en multipliant le courant par la tension. Pour déterminer la puissance absorbée par le réseau il faut multiplier l'indication de l'ampèremètre par celle du voltmètre.

Par exemple, la puissance absorbée, lorsque l'ampèremètre indique 3 A et le voltmètre indique 120 V, sera:

$$P = IU = 3 \cdot 120 = 360 \text{ W}.$$

Pour les mesures pratiques du travail (de l'énergie) du courant électrique le joule est une unité trop petite.

Si l'on prend le temps t en heures et non pas en secondes, on obtient des unités d'énergie électriques plus grandes:

1 joule = 1 W·s.

1 Wh = 3 600 wattsecondes = 3 600 J.

100 Wh = 1 hectowattheure (hWh).

1000 Wh = 1 kilowattheure (kWh).

L'énergie électrique est mesurée à l'aide de compteurs d'énergie.

Exemple 27. Calculer la puissance absorbée par un moteur électrique lorsque l'intensité du courant dans le circuit est de 8 A et le moteur est branché sur un réseau de 220 V.

$$P = IU = 8 \cdot 220 = 1760 \text{ W} = 17{,}6 \text{ hW} = 1{,}76 \text{ kW}.$$

Exemple 28. Quelle est la puissance absorbée par un réchaud électrique s'il absorbe un courant de 5 A et la résistance de sa spirale est de 24 ohms?

$$P = I^2r = 25 \cdot 24 = 600 \text{ W} = 6 \text{ hW} = 0{,}6 \text{ kW}.$$

Lorsqu'on passe de la puissance mécanique à la puissance électrique et inversement, il faut avoir en vue que:

1 cheval-vapeur (ch) = 736 W.

1 kilowatt (kW) = 1,36 ch.

Exemple 29. Calculer l'énergie absorbée par un réchaud électrique de 600 W pendant 5 heures.

$$A = P \cdot t = 600 \cdot 5 = 3000 \text{ Wh} = 30 \text{ hWh} = 3 \text{ kWh}.$$

Exemple 30. Déterminer le prix à payer lorsque 12 ampoules électriques ont fonctionné pendant 1 mois (30 jours) si quatre d'entre elles, de 60 W chacune, sont branchées 6 heures par jour et les autres huit, de 25 W chacune, sont branchées 4 heures par jour. Le prix d'un hWh est de 0,4 copeck.

La puissance des quatre lampes de 60 W chacune est:

$$P = 60 \cdot 4 = 240 \text{ W}.$$

Le nombre d'heures de fonctionnement de ces lampes est:

$$t = 6 \cdot 30 = 180 \text{ h}.$$

L'énergie absorbée par ces lampes:

$$A = P \cdot t = 240 \cdot 180 = 43\,200 \text{ Wh} = 432 \text{ hWh}.$$

La puissance totale des autres huit lampes de 25 W chacune est:

$$25 \cdot 8 = 200 \text{ W}.$$

Le nombre d'heures de fonctionnement de ces lampes pendant un mois est :

$$4 \cdot 30 = 120 \text{ h}.$$

L'énergie absorbée par ces lampes :

$$A = P \cdot t = 200 \cdot 120 = 24\,000 \text{ Wh} = 240 \text{ hWh}.$$

La quantité totale de l'énergie absorbée est :

$$432 + 240 = 672 \text{ hWh}.$$

Le coût de l'énergie totale :

$$672 \cdot 0{,}4 = 268{,}8 \text{ copecks} \approx 2{,}69 \text{ roubles}.$$

§ 24. COURT-CIRCUIT

La figure 39 indique le schéma de branchement d'une ampoule électrique sur le secteur. Si la résistance de cette ampoule $r_a = 240$ ohms et la tension du secteur $U = 120$ V, le courant dans le circuit de l'ampoule sera :

$$I = \frac{U}{r_a} = \frac{120}{240} = 0{,}5 \text{ A}.$$

Examinons le cas où les fils allant vers la lampe à incandescence ont été mis en contact par un conducteur de

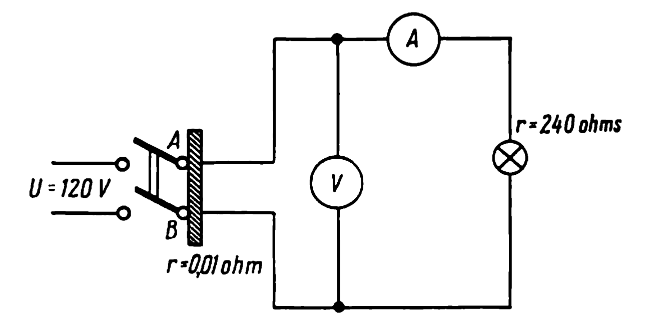


Fig. 39. Court-circuit entre les bornes d'un interrupteur à couteaux

très faible résistance, par exemple par une grosse tige métallique qui a accidentellement touché les deux fils. Dans ce cas, le courant du réseau en arrivant au point A bifurquera pour suivre deux chemins : la plus grande partie du courant passera par la tige métallique qui présente une très faible résistance, et une petite partie du courant passera

par la lampe à incandescence qui présente une grande résistance par rapport à la tige.

Calculons le courant passant par la tige métallique en admettant que sa résistance $r = 0,01$ ohm.

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120}{0,01} = 12\,000 \text{ A}.$$

En réalité, dans le cas d'un court-circuit la tension du secteur sera inférieure à 120 V, car un fort courant provoquera dans le réseau une grande chute de tension et le courant passant par la tige métallique sera également inférieure à 12 000 A. Néanmoins, ce courant sera de beaucoup supérieur à celui qui était précédemment absorbé par la lampe à incandescence.

En passant par un conducteur, le courant dégage de la chaleur et le conducteur s'échauffe. Dans l'exemple indiqué, la section des fils du circuit électrique était prévue pour un faible courant de 0,5 A. Lors d'un court-circuit un courant très fort de 12 000 A passera par le circuit. Un tel courant provoquera le dégagement d'une énorme quantité de chaleur, ce qui aura pour résultat la carbonisation et la destruction de l'isolation des fils, la fusion des conducteurs, la détérioration des appareils de mesure, la fusion des contacts des interrupteurs, etc. La source de tension qui alimente un tel réseau peut également être endommagée. L'échauffement excessif des fils peut provoquer un incendie.

Chaque réseau électrique est calculé pour un courant normal déterminé. Le régime de fonctionnement d'un réseau, quand par suite de la diminution de la résistance le courant augmente très fortement par rapport à sa valeur nominale, est appelé *régime de court-circuit*.

Etant donné les dangereuses conséquences d'un court-circuit, il est nécessaire d'observer certaines règles de montage et d'exploitation des installations électriques. Les principales règles sont les suivantes:

1) l'isolation des fils doit correspondre à sa destination (à la tension et aux conditions de fonctionnement du réseau);

2) la section des fils doit être telle que leur échauffement lors du fonctionnement n'atteigne pas une valeur dangereuse;

3) les fils doivent être bien protégés contre tout endommagement mécanique;

4) les fils doivent être posés sur des isolateurs possédant une résistance mécanique et une rigidité diélectrique suffisantes;

5) les endroits de connexion et de dérivation doivent être aussi bien isolés que les fils;

6) le croisement des fils doit être fait de façon qu'ils ne se touchent pas;

7) les fils passant par les murs, le plafond et le plancher doivent être posés de façon à être protégés contre l'humidité, les endommagements d'origine mécanique et chimique, et doivent être bien isolés.

Pour prévenir un accroissement dangereux du courant en cas d'un court-circuit on protège le réseau par des coupe-circuit. Le coupe-circuit comprend un élément fusible branché en série avec le réseau. Lorsque l'intensité de courant augmente au-delà d'une certaine limite, l'élément fusible s'échauffe et fond, le circuit est donc automatiquement coupé et le courant y disparaît. Les coupe-circuit seront décrits plus en détail au § 54.

§ 25. DEUXIÈME LOI DE KIRCHHOFF. APPLICATION DES LOIS DE KIRCHHOFF POUR LE CALCUL DES CIRCUITS ÉLECTRIQUES

Lors du calcul des circuits électriques on rencontre souvent des circuits fermés. En plus des résistances les circuits fermés peuvent comporter des forces électromotrices.

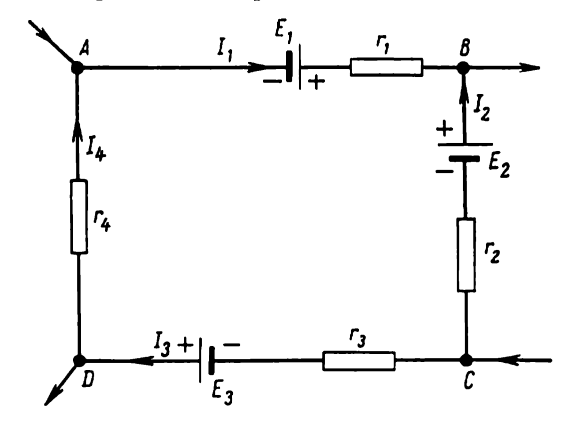


Fig. 40. Maille d'un circuit électrique complexe

Sur la figure 40 est représentée une portion d'un circuit électrique complexe. La polarité de toutes les F.É.M. est donnée. Choisissons arbitrairement le sens positif des cou-

rants. Parcourons le circuit depuis le point A dans un sens arbitraire, par exemple, dans le sens horaire. Examinons le tronçon AB. Dans cette portion se produit une chute de potentiel (le courant circule depuis le point à potentiel plus élevé vers le point à potentiel moins élevé).

Dans la portion AB:

$$\varphi_A + E_1 - I_1 r_1 = \varphi_B.$$

Dans la portion BC:

$$\varphi_B - E_2 - I_2 r_2 = \varphi_C.$$

Dans la portion CD:

$$\varphi_C - I_3 r_3 + E_3 = \varphi_D.$$

Dans la portion DA:

$$\varphi_D - I_4 r_4 = \varphi_A.$$

En additionnant terme à terme les quatre équations indiquées, on obtient:

$$\varphi_A + E_1 - I_1 r_1 + \varphi_B - E_2 - I_2 r_2 + \varphi_C - I_3 r_3 + \\ + E_3 + \varphi_D - I_4 r_4 = \varphi_B + \varphi_C + \varphi_D + \varphi_A \text{ ou}$$

$$E_1 - I_1 r_1 - E_2 - I_2 r_2 - I_3 r_3 + E_3 - I_4 r_4 = 0.$$

En portant les produits $I \cdot r$ dans le membre de droite, on obtient:

$$E_1 - E_2 + E_3 = I_1 r_1 + I_2 r_2 + I_3 r_3 + I_4 r_4.$$

Sous la forme générale:

$$\sum E = \sum Ir.$$

Cette expression traduit la deuxième loi de Kirchhoff. La formule montre que *dans tout circuit fermé la somme algébrique des forces électromotrices est égale à la somme algébrique des chutes de tension, dues aux résistances.*

Examinons un circuit fermé simple (fig. 41).

La deuxième loi de Kirchhoff donne:

$$\sum E = \sum Ir;$$

d'où

$$E = Ir_0 + Ir = I(r_0 + r),$$

d'où

$$I = \frac{E}{r_0 + r}.$$

Nous avons obtenu la formule de la loi d'Ohm pour le circuit entier.

Nous allons résoudre maintenant quelques problèmes en utilisant la loi d'Ohm et les deux lois de Kirchhoff.

Exemple 31. Quelle est l'intensité de courant dans le circuit électrique de la figure 42 ?

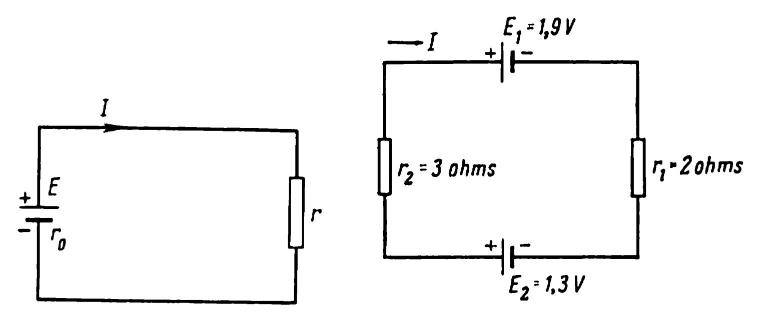


Fig. 41. Circuit fermé simple

Fig. 42. Circuit électrique se rapportant à l'exemple 31

Choisissons arbitrairement le sens positif du courant. En parcourant le circuit dans le sens des aiguilles d'une montre on peut écrire l'équation de la deuxième loi de Kirchhoff:

$$-E_1+E_2=I\cdot r_1+I\cdot r_2; \quad -1{,}9+1{,}3=I\,(2+3);$$

$$-0{,}6=5I; \quad I=-0{,}12 \text{ A}.$$

Le signe « moins » signifie que le sens choisi est opposé au sens réel du courant.

Exemple 32. Calculer les courants dans les différentes portions du circuit électrique de la figure 43.

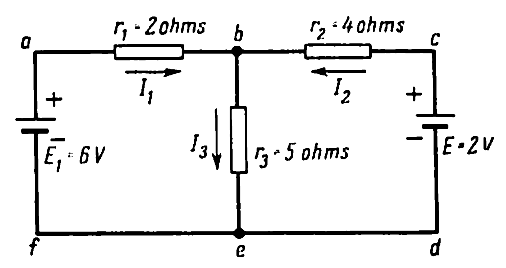


Fig. 43. Circuit électrique se rapportant à l'exemple 32

Chosissons arbitrairement les sens positifs des courants.

Pour le circuit *abef*:

$$6=2I_1+5I_3. \quad (1)$$

Pour le circuit *acdf*:

$$6-2=2I_1-4I_2; \quad 2=I_1-2I_2. \quad (2)$$

Pour le point *b*, on a d'après la première loi de Kirchhoff:

$$I_3=I_1+I_2. \quad (3)$$

On a, ainsi, trois équations à trois inconnues. En les résolvant, on trouve la valeur et les sens des courants. En introduisant dans l'équation (1) la valeur du courant I_3 tirée de l'équation (3), on obtient:

$$6=2I_1+5I_1+5I_2;$$

$$6=7I_1+5I_2$$

$$+$$

$$2=I_1-2I_2$$

ou

$$12=14I_1+10I_2$$

$$+$$

$$10=5I_1-10I_2.$$

En additionnant les deux dernières équations, on obtient:

$$22=19I_1, \text{ d'où } I_1=1,156 \text{ A}.$$

Introduisons la valeur de I_1 dans l'équation (1):

$$6=2\cdot 1,156+5I_3;$$

$$I_3=\frac{6-2\cdot 1,156}{5}=0,74 \text{ A}.$$

Introduisons la valeur de I_1 dans l'équation (2):

$$2=1,156-2I_2,$$

d'où

$$I_2=\frac{-2+1,156}{2}=-0,422\text{A}.$$

Le signe « moins » montre que le sens réel du courant I_2 est opposé à celui que nous avons adopté.

§ 26. MÉTHODE DE SUPERPOSITION

La méthode de superposition est utilisée pour le calcul des circuits électriques comportant plusieurs forces électromotrices. Cette méthode consiste en ce que le courant dans une partie quelconque du circuit est considéré comme comprenant plusieurs courants partiels provoqués chacun

par une force électromotrice séparée, les autres F.É.M. étant considérées comme nulles.

Examinons l'exemple suivant:

Exemple 33 (fig. 44, *a*). On a: $E_1 = 27$ V, $E_2 = 24$ V, $r_1 = 3$ ohms, $r_2 = 4$ ohms, $r_3 = 6$ ohms. Déterminer la répartition des courants dans le circuit.

Calculons les courants créés par la F.É.M. E_1 (la F.É.M. E_2 est considérée comme nulle) (fig. 44, *b*).

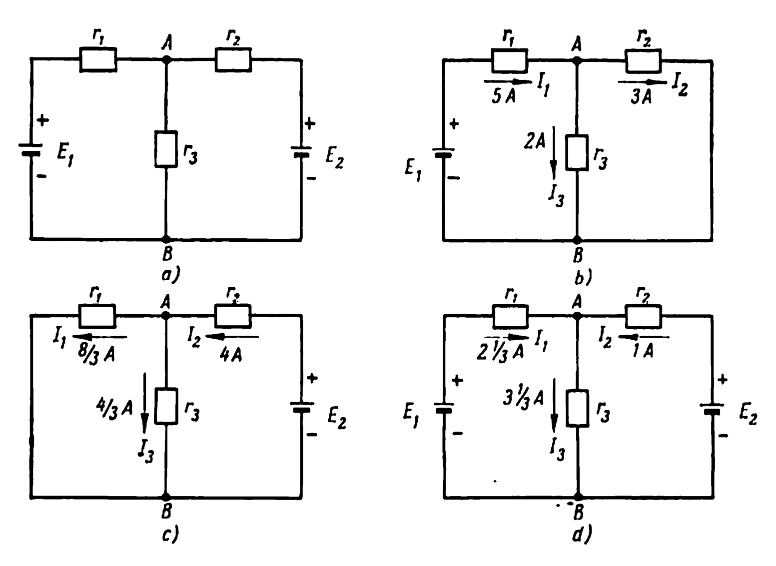


Fig. 44. Méthode de superposition se rapportant à l'exemple 33

Choisissons les sens positifs des courants et déterminons les résistances des portions de circuit et les courants dans chaque portion. Les résistances r_2 er r_3 sont associées en parallèle. Leur résistance équivalente est donc:

$$r_{2,\,3} = \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3} = \frac{4 \cdot 6}{4 + 6} = 2{,}4 \text{ ohms.}$$

La résistance équivalente du circuit:

$$r = r_1 + r_{2,\,3} = 3 + 2{,}4 = 5{,}4 \text{ ohms.}$$

Le courant dans la portion commune de circuit:

$$I_1 = \frac{E_1}{r} = \frac{27}{5{,}4} = 5 \text{ A.}$$

La tension entre les points A et B :

$$U_{AB}=E_1-I_1r_1=27-5\cdot3=12 \text{ V}.$$

Les courants dans les branches parallèles :

$$I_2=\frac{U_{AB}}{r_2}=\frac{12}{4}=3 \text{ A}.$$

$$I_3=\frac{U_{AB}}{r_3}=\frac{12}{6}=2 \text{ A}.$$

Vérification: $I_2+I_3=3+2=5\text{A}=I_1$.

Calculons maintenant les courants créés par la F.É.M. E_2 (en admettant que la F.É.M. E_1 est nulle) (fig. 44, *c*). Choisissons les sens positifs des courants et déterminons les résistances des portions de circuit et les courants dans chaque portion

$$r_{1,3}=\frac{r_1r_3}{r_1+r_3}=\frac{3\cdot6}{3+6}=2 \text{ ohms};$$

$$r=r_2+r_{1,3}=4+2=6 \text{ ohms};$$

$$I_2=\frac{U_{AB}}{r}=\frac{24}{6}=4 \text{ A};$$

$$U_{AB}=E_2-I_2r_2=24-4\cdot4=8 \text{ V};$$

$$I_1=\frac{U_{AB}}{r_1}=\frac{8}{3} \text{ A};$$

$$I_3=\frac{U_{AB}}{r_3}=\frac{8}{6}=\frac{4}{3} \text{ A}.$$

Vérification: $I_1+I_3=\frac{8}{3}+\frac{4}{3}=\frac{12}{3}=4 \text{ A}=I_2$.

En comparant les deux derniers schémas (fig. 44, *b* et *c*), on voit que chaque portion (chaque branche) de circuit est traversée par deux courants. En additionnant algébriquement ces courants (tableau 6), on obtient le courant réel dans la portion donnée.

Tableau 6

Courant dans la portion	Figure 44, *b*	Figure 44, *c*	Courant réel et son sens
I_1	Vers la droite, 5 A	Vers la gauche, 8/3 A	Vers la droite, 7/3 A
I_2	Vers la droite, 3 A	Vers la gauche, 4 A	Vers la gauche, 1 A
I_3	Vers le bas, 2 A	Vers le bas, 4/3 A	Vers le bas, 10/3 A

Vérification: D'après la première loi de Kirchhoff, on a pour le point A:

$$I_1+I_2+I_3=\frac{7}{3}+1-\frac{10}{3}=0.$$

La répartition des courants du schéma représenté par la figure 44, *a* est donnée sur la figure 44, *d*.

§ 27. MÉTHODE DE TENSION NODALE

Dans les problèmes que l'on a à résoudre en pratique on trouve des circuits ne comportant que deux nœuds. Entre ces nœuds peut être inséré un nombre quelconque de branches. Le calcul de pareils circuits se trouve fortement simplifié si l'on utilise la méthode de tension nodale. Examinons

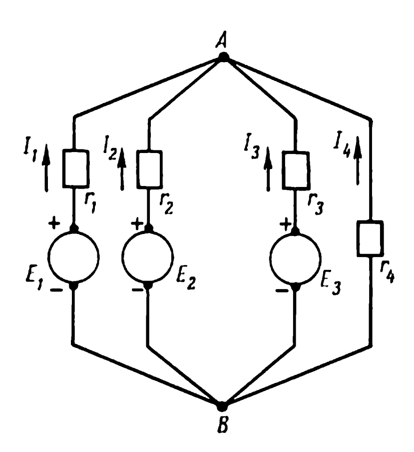


Fig. 45. Méthode de tension nodale

cette méthode. La figure 45 représente un circuit électrique dérivé avec deux nœuds A et B entre lesquels sont connectées quatre branches parallèles. Les trois premières branches comportent des sources de tension (générateurs), dont les F.É.M. respectives sont E_1, E_2, E_3. Dans ces branches les résistances r_1, r_2, r_3 sont connectées en série avec les générateurs (les résistances internes des générateurs peuvent être également comprises dans ces résistances). La quatrième branche comporte une seule résistance r_4. Les sens positifs des courants dans chaque branche ont été choisis

depuis le point B vers le point A. Étant donné que dans les trois premières branches le sens du courant coïncide avec celui des F.É.M. des sources de tension, ces dernières fonctionnent en générateurs. Si l'on désigne par U la tension entre les nœuds A et B, le courant dans la première branche sera :

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{r_1} = (E_1 - U)\, G_1,$$

c.-à-d. :

$$I_1 = (E_1 - U)\, G_1 ;$$

de façon analogue, on a pour les autres branches

$$I_2 = (E_2 - U)\, G_2 ;$$

$$I_3 = (E_3 - U)\, G_3 ;$$

$$I_4 = (0 - U)\, G_4 = -UG_4.$$

En appliquant au nœud A la première loi de Kirchhoff, on obtient :

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0.$$

En remplaçant les courants par leurs expressions respectives, cette équation prend la forme suivante :

$$(E_1 - U)\, G_1 + (E_2 - U)\, G_2 + (E_3 - U)\, G_3 - UG_4 = 0,$$

d'où

$$U = \frac{E_1G_1 + E_2G_2 + E_3G_3}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4} .$$

On a obtenu ainsi la formule de la tension nodale.

Le numérateur de cette formule contient la somme algébrique des produits des F.É.M. des branches par les conductances de ces branches. Le dénominateur de la formule comporte la somme des conductances de toutes les branches. Si la F.É.M. d'une des branches a un sens opposé à celui indiqué sur la figure 45, elle entre dans la formule de la tension nodale avec le signe « — ». Sous sa forme générale, la formule de la tension nodale peut être écrite comme suit :

$$U = \frac{\sum EG}{\sum G} .$$

En appliquant la formule de la tension nodale, résolvons maintenant le problème suivant.

Exemple 34. Le circuit représenté par la figure 45 comporte les génératrices suivantes: $E_1 = 110$ V; $E_2 = 115$ V; $E_3 = 120$ V. Les résistances internes des génératrices sont: $r_{01} = 0{,}2$ ohm; $r_{02} = 0{,}1$ ohm; $r_{03} = 0{,}3$ ohm. Les résistances des branches sont: $r_1 = 2{,}3$ ohms; $r_2 = 4{,}9$ ohms; $r_3 = 4{,}7$ ohms, $r_4 = 5$ ohms. Calculer les courants dans chaque branche.

S o l u t i o n. Déterminons la conductance de chaque branche:

$$G_1 = \frac{1}{r_{01}+r_1} = \frac{1}{0{,}2+2{,}3} = \frac{1}{2{,}5} = 0{,}4\,\frac{1}{\text{ohm}};$$

$$G_2 = \frac{1}{r_{02}+r_2} = \frac{1}{0{,}1+4{,}9} = \frac{1}{5} = 0{,}2\,\frac{1}{\text{ohm}};$$

$$G_3 = \frac{1}{r_{03}+r_3} = \frac{1}{0{,}3+4{,}7} = \frac{1}{5} = 0{,}2\,\frac{1}{\text{ohm}};$$

$$G_4 = \frac{1}{r_4} = \frac{1}{5} = 0{,}2\,\frac{1}{\text{ohm}}.$$

Calculons la tension nodale:

$$U = \frac{E_1G_1+E_2G_2+E_3G_3}{G_1+G_2+G_3+G_4} = \frac{110\cdot 0{,}4+115\cdot 0{,}2+120\cdot 0{,}2}{0{,}4+0{,}2+0{,}2+0{,}2} = 91 \text{ V}.$$

Déterminons les courants dans les branches:

$$I_1 = (E_1-U)\,G_1 = (110-91)\cdot 0{,}4 = 7{,}6 \text{ A};$$

$$I_2 = (E_2-U)\,G_2 = (115-91)\cdot 0{,}2 = 4{,}8 \text{ A};$$

$$I_3 = (E_3-U)\,G_3 = (120-91)\cdot 0{,}2 = 5{,}8 \text{ A};$$

$$I_4 = -UG_4 = -91\cdot 0{,}2 = -18{,}2 \text{ A}.$$

Le signe « — » du courant I_4 montre que le sens réel du courant est inverse de celui indiqué sur la figure 45.

Examinons le fonctionnement de deux génératrices à excitation en dérivation ayant les mêmes F.É.M. ($E_1 = E_2$) et les mêmes résistances internes ($r_{01} = r_{02}$). Le schéma de branchement des génératrices est indiqué sur la figure 45. Soit $E_1 = E_2 = 110$ V; $r_{01} = r_{02} = 0{,}2$ ohm. La résistance du récepteur $r_3 = 1$ ohm. Calculer la puissance développée par les génératrices.

En appliquant la formule de la tension nodale, on a:

$$U = \frac{E_1G_1+E_2G_2}{G_1+G_2+G_3} = \frac{2\cdot 110\,\frac{1}{0{,}2}}{\frac{1}{0{,}2}+\frac{1}{0{,}2}+1} = 100 \text{ V}.$$

Les courants des génératrices:

$$I_1 = (E_1-U)\,G_1 = (110-100)\cdot\frac{1}{0{,}2} = 50 \text{ A};$$

$$I_2 = 50 \text{ A}.$$

Les puissances développées par les génératrices :

$$P_1 = E_1 I_1 = 110 \cdot 50 = 5500 \text{ W} ;$$

$$P_2 = 5500 \text{ W}.$$

Cet exemple montre que lorsque les F.É.M. de plusieurs génératrices et leurs résistances internes sont les mêmes, les puissances qu'elles fournissent au réseau sont également les mêmes.

Supposons maintenant que la F.É.M. de la deuxième génératrice E_2 soit devenue égale à 121 V.

Dans ce cas, la tension nodale sera :

$$U = \frac{110 \cdot \frac{1}{0,2} + 121 \cdot \frac{1}{0,2}}{\frac{1}{0,2} + \frac{1}{0,2} + 1} = 105 \text{ V}.$$

Les courants des génératrices seront :

$$I_1 = (110 - 105) \cdot \frac{1}{0,2} = 25 \text{ A} ;$$

$$I_2 = (121 - 105) \cdot \frac{1}{0,2} = 80 \text{ A}.$$

Le courant du récepteur sera :

$$I_3 = \frac{105}{1} = 105 \text{ A}.$$

Les puissances produites par les génératrices :

$$P_1 = 110 \cdot 25 = 2750 \text{ W} ;$$

$$P_2 = 121 \cdot 80 = 9680 \text{ W}.$$

Il en résulte que lors de l'association en parallèle de génératrices à courant continu à résistances internes identiques, la génératrice ayant une F.É.M. plus grande sera la plus chargée.

Examinons, enfin, le cas des génératrices associées en parallèle, à F.É.M. identiques, mais à résistances internes différentes.

Exemple 35. La F.É.M. des génératrices $E_1 = E_2 = 110$ V, leurs résistances internes sont respectivement $r_{01} = 0{,}2$ ohm et $r_{02} = 0{,}25$ ohm. La résistance externe du circuit $r = 1$ ohm. Quelles sont les intensités des courants débités par les génératrices ?

Calculons la tension nodale:

$$U=\frac{110\cdot\frac{1}{0,2}+110\cdot\frac{1}{0,25}}{\frac{1}{0,2}+\frac{1}{0,25}+1}=99\ \text{V}.$$

Les courants des génératrices sont:

$$I_1=(110-99)\frac{1}{0,2}=55\ \text{A};$$

$$I_2=(110-99)\frac{1}{0,25}=44\ \text{A}.$$

Le courant de charge:

$$I_3=\frac{99}{1}=99\ \text{A}.$$

En cas d'association en parallèle de génératrices à courant continu ayant les F.É.M. égales, mais les résistances internes différentes, la génératrice ayant la plus petite résistance interne est celle qui sera la plus chargée.

§ 28. MÉTHODE DES COURANTS DE MAILLE

Cette méthode est utilisée pour le calcul des circuits électriques complexes comportant plus de deux nœuds. La figure 46, *a* montre un tel circuit. Il comporte trois mailles, la maille médiane ayant des portions appartenant également aux deux mailles voisines et des portions ne faisant partie que d'une seule maille.

Cette méthode a pour base l'hypothèse que dans chaque maille circule son propre courant (courant de maille). Dans la portion commune, située à la limite de deux mailles voisines, circulera un courant égal à la somme algébrique des courants de ces mailles.

Choisissons le sens positif des trois courants de maille comme il est indiqué sur la figure par des flèches. Ecrivons ensuite trois équations d'après la deuxième loi de Kirchhoff en parcourant toutes les trois mailles dans un même sens, par exemple, dans le sens des aiguilles d'une montre.

Pour la maille *I* on a:

$$E_1=I_1r_1+(I_1-I_2)\,r_2. \qquad \text{(a)}$$

Pour la maille *II*:

$$0=I_2r_3+(I_2-I_1)\,r_2+(I_2-I_3)\,r_4. \qquad (b)$$

Pour la maille *III* :

$$E_2 = I_3 r_5 + (I_3 - I_2)\, r_4. \qquad \text{(c)}$$

On voit que le nombre d'équations est égal au nombre de mailles, donc il est inférieur à celui que donnent les

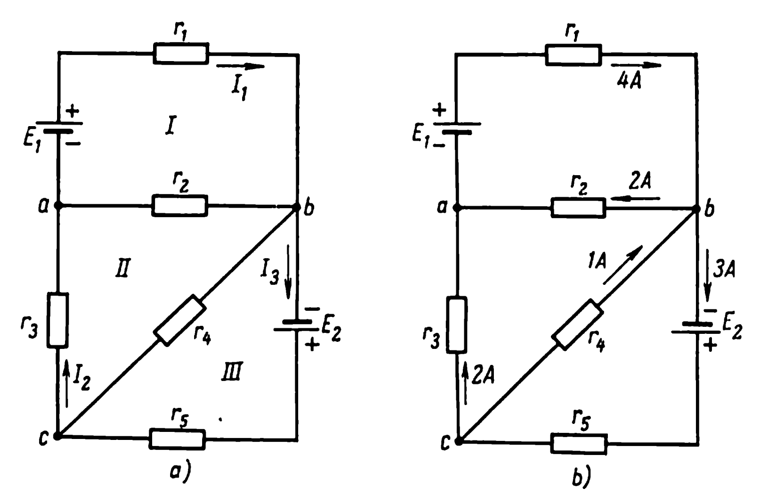


Fig. 46. Méthode de courants de maille

lois de Kirchhoff pour la solution du problème. En résolvant le système d'équations, on trouve les courants de maille, d'où on détermine les courants dans chaque branche.

Exemple 36. Quelle est la répartition des courants dans le circuit représenté par la figure 46, *a*, si $E_1 = 14$ V, $E_2 = 20$ *V*, $r_1 = 2$ ohms, $r_2 = 3$ ohms, $r_3 = 4$ ohms, $r_4 = 2$ ohms, $r_5 = 6$ ohms ?

S o l u t i o n. L'équation pour la maille *I* d'après la formule (a) est :

$$14 = I_1 2 + (I_1 - I_2)\, 3,$$

$$14 = 2I_1 + 3I_1 - 3I_2,$$

$$14 = 5I_1 - 3I_2. \qquad \text{(a')}$$

L'équation pour la maille *II*, d'après la formule (b), est :

$$0 = I_2 4 + (I_2 - I_1)\, 3 + (I_2 - I_3)\, 2,$$

$$0 = 4I_2 + 3I_2 - 3I_1 + 2I_2 - 2I_3,$$

$$0 = 9I_2 - 3I_1 - 2I_3. \qquad \text{(b')}$$

L'équation pour la maille *III* d'après la formule (c) est :

$$20 = 6I_3 + (I_3 - I_2)\,2,$$
$$20 = 6I_3 + 2I_3 - 2I_2,$$
$$20 = 8I_3 - 2I_2,$$
$$10 = 4I_3 - I_2. \qquad \text{(c')}$$

En additionnant les expressions (a') et (b'), on obtient :

$$\begin{array}{r} 14 = 5I_1 - 3I_2 \\ + \\ 0 = 9I_2 - 3I_1 - 2I_3 \end{array}$$

ou

$$\begin{array}{r} 42 = 15I_1 - 9I_2 \\ + \\ 0 = 45I_2 - 15I_1 - 10I_3 \\ \hline 42 = 36I_2 - 10I_3 \end{array} \qquad \text{(d)}$$

En prenant la somme des formules (c') et (d), on obtient :

$$\begin{array}{r} 10 = 4I_3 - I_2 \\ + \\ 42 = 36I_2 - 10I_3 \end{array}$$

ou

$$\begin{array}{l} 50 = 20I_3 - 5I_2 \\ + \\ 84 = 72I_2 - 20I_3 \\ \hline 134 = 67I_2, \text{ d'où } I_2 = \frac{134}{67} = 2\text{A}. \end{array}$$

En introduisant la valeur du courant I_2 dans l'équation (c'), on obtient

$$10 = 4I_3 - 2,$$
$$10 + 2 = 4I_3,$$

d'où

$$I_3 = \frac{12}{4} = 3\text{A}.$$

En introduisant la valeur du courant I_2 dans l'équation (a')' on obtient :

$$14 = 5I_1 - 6,$$
$$20 = 5I_1,$$

d'où

$$I_1 = \frac{20}{5} = 4\text{A}.$$

Ainsi, tous les courants de maille sont déterminés.

Ensuite, on détermine les courants dans les différentes portions de circuit en prenant la somme algébrique des courants de maille qui y circulent. La répartition des courants dans les portions du circuit est donnée sur la figure 46, *b*.

§ 29. CONDUCTEURS MÉTALLIQUES

Selon la théorie moderne, un cristal de métal comprend des ions positifs et des électrons libres. Les ions de métal sont disposés aux mêmes distances l'un de l'autre et forment un réseau cristallin spatial régulier. A l'intérieur du réseau, les électrons libres se déplacent de façon chaotique, tout comme les molécules de gaz dans l'air. Dans un réseau cristallin parfait d'un métal les électrons se déplaceraient aussi facilement que dans le vide. Mais l'existence d'impuretés déformant le réseau et le mouvement thermique des atomes à l'intérieur du métal s'opposent au mouvement des électrons. Certains électrons quittant les orbites de leur atome pénètrent dans le champ des atomes voisins et entrent en collision avec leurs électrons. Par suite des collisions il se peut que ces derniers électrons quittent à leur tour leurs orbites, en formant ainsi de nouvelles portions d'électrons libres.

Au § 2 nous avons souligné que les électrons dans l'atome ne possèdent que certaines quantités d'énergie bien déterminées (niveaux énergétiques). Dans la plupart de métaux les bandes de valence et de conduction se recouvrent et il n'y a pas de bande interdite entre elles. Les électrons passent donc facilement de la bande de valence à la bande de conduction, ce qui conditionne une haute conductance électrique des métaux. Si l'on applique aux extrémités d'un conducteur métallique une force électromotrice, les électrons libres acquerront sous l'influence du champ électrique une vitesse complémentaire. Avec l'accroissement de l'intensité du champ, une partie de plus en plus grande d'électrons (qui précédemment se déplaçaient de façon chaotique) participent au mouvement ordonné. Un courant électrique apparaît dans le conducteur. Dans leur mouvement, les électrons entrent en collision avec les parties constitutives des atomes et des molécules du métal et leur cèdent une partie de leur énergie cinétique en augmentant leur mouvement thermique. Il en résulte une élévation de la température du conducteur. Comme nous l'avons déjà indiqué, les mouvements thermiques des particules du

métal rendent plus difficile le mouvement des électrons. Il en résulte qu'avec l'élévation de la température du conducteur sa résistance électrique augmente. Les impuretés contribuent également à l'accroissement de la résistance du conducteur. On peut admettre qu'à zéro absolu (—273 °C) la résistance des métaux privés d'impuretés doit être nulle. C'est le phénomène de la supraconductivité.

§ 30. PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX CONDUCTEURS

Les principales caractéristiques des matériaux conducteurs sont les suivantes.

1. La résistivité électrique.
2. Le coefficient thermique de résistance.
3. La conductibilité thermique.
4. La différence de potentiel de contact et la force thermo-électromotrice.
5. La résistance à la rupture et l'allongement unitaire lors de la traction.

Considérons brièvement ces caractéristiques.

1. La résistivité électrique ρ est une grandeur qui caractérise la propriété du matériau d'opposer une résistance au passage du courant électrique. Elle s'exprime par la formule suivante :

$$\rho = \frac{rS}{l}.$$

Pour de longs conducteurs (fils, cordons, câbles, barres), on exprime généralement la longueur l du conducteur en mètres, la section S en mm², la résistance r en ohms. La formule aux dimensions de la résistivité est alors :

$$[\rho] = \frac{\text{ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}.$$

La résistivité de différents métaux est indiquée plus loin, dans le tableau 8.

2. Le coefficient thermique de résistance α est une grandeur qui caractérise la variation de la résistance du conducteur en fonction de la température.

La valeur moyenne de ce coefficient dans la plage de température $t_2^\circ - t_1^\circ$ peut être exprimée par la formule :

$$\alpha = \frac{r_2 - r_1}{r_1 (t_2^\circ - t_1^\circ)} \frac{1}{\text{degré}}.$$

Les coefficients thermiques de différents conducteurs sont indiqués plus loin dans le tableau 7.

3. La conductibilité thermique λ est une grandeur qui caractérise la quantité de chaleur traversant une couche de la substance en une unité de temps. La conductibilité thermique λ est mesurée en $\frac{\text{kilocal}}{\text{m}\cdot\text{heure}\cdot\text{degré}}$. Elle a une grande importance lors du calcul thermique des machines, appareils et câbles électriques.

Conductibilité thermique λ de certains matériaux

Argent	350 à 360	$\frac{\text{kilocal}}{\text{m}\cdot\text{heure}\cdot\text{degré}}$
Cuivre	340	»
Aluminium	180 à 200	»
Laiton	90 à 100	»
Fer, acier	40 à 50	»
Bronze	30 à 40	»
Béton	0,7 à 1,2	»
Briques	0,5 à 1,2	»
Verre	0,6 à 0,9	»
Amiante	0,13 à 0,18	»
Bois	0,1 à 0,15	»
Liège	0,04 à 0,08	»

On voit que les métaux possèdent la plus grande conductibilité thermique. Celle des matériaux non métalliques est beaucoup plus faible. Elle est particulièrement petite pour les substances poreuses utilisées pour l'isolement thermique. Selon la théorie électronique, la haute conductibilité thermique des métaux est conditionnée par les mêmes électrons de conduction que la conductibililité électrique.

4. Différence de potentiel de contact et force thermoélectromotrice.

Comme il a déjà été indiqué, les ions positifs d'un métal sont disposés dans les nœuds du réseau cristallin formant, pour ainsi dire, une carcasse. Les électrons libres remplissent le réseau comme un gaz, appelé parfois « gaz électronique ». La pression du gaz électronique dans le métal est proportionnelle à la température absolue et au nombre d'électrons libres par unité de volume dépendant des propriétés du métal. Lorsque deux métaux différents sont mis en contact, la pression du gaz électronique s'égalise à l'endroit de contact. Grâce à la diffusion des électrons, le métal dont le nombre d'électrons diminue acquiert une charge positive et le métal dont le nombre d'électrons augmente acquiert

une charge négative. Une différence de potentiel apparaît à l'endroit de contact. Elle est proportionnelle à la différence de température des métaux et dépend de la nature des métaux. Si l'on ferme le circuit, un courant thermoélectrique apparaît. La F.É.M. qui engendre ce courant est appelée *force thermo-électromotrice.*

Le phénomène de différence de potentiel de contact est utilisé pour mesurer la température à l'aide des couples thermoélectriques (voir § 56). Lors de la mesure de faibles intensités et tensions, une grande différence de potentiel apparaissant aux endroits de contact de différents métaux peut déformer les résultats des mesures. Dans ce cas, le choix des matériaux doit être fait de telle sorte que la précision des mesures soit élevée.

5. Résistance à la rupture et allongement unitaire lors de la traction.

Lors du choix des fils il faut prendre en considération non seulement leurs sections, le matériau dont ils sont faits et l'isolation, mais aussi leur résistance mécanique. Cela est important pour les fils des lignes aériennes. Les fils sont soumis à la traction et, sous l'action de la force appliquée, ils s'allongent. En désignant la longueur initiale par l_1 et la longueur finale par l_2, la différence $l_2 - l_1 = \Delta l$ sera *l'allongement absolu.*

Le rapport $\frac{l_2 - l_1}{l_1} = \frac{\Delta l}{l_1} = \varepsilon$ est appelé *allongement relatif* ou *unitaire.*

La force provoquant la rupture du matériau est appelée *charge de rupture* et le rapport de cette charge à la section du matériau au moment de la rupture est appelée *résistance à la rupture* et est désigné par $\sigma_r \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$. Les données concernant la résistance *à la rupture* de différents matériaux sont indiquées plus loin, dans le tableau 7.

§ 31. MATÉRIAUX CONDUCTEURS

L'électrotechnique moderne utilise des conducteurs solides, liquides et parfois même gazeux. La majorité des métaux sont des conducteurs solides. Les électrolytes et les métaux fondus sont des conducteurs liquides. Dans les tubes à décharge on utilise des gaz comme conducteurs.

Les conducteurs métalliques peuvent être séparés en deux groupes : matériaux à haute conductance et matériaux

à haute résistance. Au premier groupe appartiennent les métaux chimiquement purs: le cuivre et l'aluminium, utilisés pour la fabrication des fils, des câbles, des enroulements de machines électriques et de transformateurs. Certains alliages tels que le bronze et le laiton ainsi que les divers alliages d'aluminium et l'acier sont également de bons conducteurs. Ils sont largement utilisés grâce à leur faible prix comparé aux métaux purs, ainsi que grâce à leurs propriétés mécaniques élevées.

Au second groupe de matériaux appartiennent les métaux et les alliages à haute résistance utilisés dans les appareils de chauffage électrique, les lampes à incandescence, les rhéostats, etc. On utilise aussi les différentes pièces en charbon, par exemple, dans les appareils d'éclairage (projecteurs), pour la commutation du courant dans les machines électriques (balais), en électrométallurgie (électrodes), dans le matériel de transmissions (grenaille de charbon des microphones).

§ 32. MATÉRIAUX À HAUTE CONDUCTANCE

C u i v r e. C'est le métal le plus utilisé en électrotechnique. Ses avantages sont: une faible résistivité ($\rho =$ $= 0{,}0172$ à $0{,}0175$ ohm·mm²/m); une résistance mécanique assez élevée (résistance à la rupture: 25 à 40 kgf/mm²); une bonne tenue à la corrosion; un usinage facile; une bonne soudabilité.

Dans les domaines d'électrotechnique où on a besoin d'une résistance mécanique, d'une dureté et d'une résistance à l'usure élevées, on utilise le cuivre dur (étiré) de marque MT. Le cuivre de cette marque est employé pour la fabrication des fils destinés aux lignes aériennes, des fils de contact, des barres pour postes de distribution, des lames de collecteurs des machines électriques. Le cuivre dur chauffé à la température de 400 à 700 °C et puis lentement refroidi devient doux. Le cuivre doux de marque MM est utilisé pour la fabrication des fils de section circulaire et rectangulaire, des brins de câble, des fils de bobinage.

En électrotechnique on utilise des alliages à base de cuivre tels que le bronze et le laiton.

B r o n z e. C'est un alliage de cuivre et d'étain, de silicium, de phosphore, de bérillium, de cadmium et d'autres éléments. Il a une résistance mécanique et une dureté plus

élevées que celles du cuivre (la résistance à la rupture d'un fil de bronze est de 80 à 135 kgf/mm²). La conductance du bronze est inférieure à celle du cuivre (10 à 95 % de celle du cuivre).

L a i t o n. C'est un alliage comprenant 50 à 70 % de cuivre et 30 à 50 % de zinc. Il est facilement usiné et s'emploie pour les réalisations de différentes pièces par découpage et estampage.

A l u m i n i u m. Il occupe la troisième place (après l'argent et le cuivre) par sa conductance ($\rho = 0{,}029$ ohm × × mm²/m).

L'aluminium possède des propriétés mécaniques inférieures à celles du cuivre. L'aluminium doux de marque AM a une résistance à la rupture de 8 à 9 kgf/mm². L'aluminium dur, non recuit, de marque AT, a une résistance à la rupture de 18 kgf/mm². Pour augmenter la résistance mécanique de l'aluminium on l'allie au silicium, au fer, et au magnésium. Pour les fils des lignes aériennes on utilise l'un de ses alliages, dit aldrey (0,3 à 0,5 % de magnésium, 0,4 à 0,7 % de silicium, 0,2 à 0,3 % de fer, le reste étant de l'aluminium). La résistance à la rupture de cet alliage est de 35 kgf/mm². Pour la construction des lignes de transport on utilise également des fils en aluminium avec âme en brins d'acier torsadés. Cette âme d'acier est entourée de fil d'aluminium. En électrotechnique, l'aluminium est utilisé pour la fabrication de fils, de barres à section circulaire et rectangulaire, de feuilles minces pour condensateurs et d'enveloppes de certains câbles.

A c i e r. Il se caractérise par sa grande résistance mécanique. L'acier utilisé comme conducteur contient de 0,10 à 0,15 % de carbone et présente une résistance à la rupture de 70 à 75 kgf/mm². La résistivité de l'acier est d'environ 0,1 ohm·mm²/m, et sa conductance est donc 6 à 7 fois inférieure à celle du cuivre. Il est meilleur marché que le cuivre et l'aluminium, mais a un grand défaut: sa tenue à la corrosion est faible. Pour protéger l'acier contre la corrosion, on le couvre d'une couche de métal plus résistant (par exemple, de zinc). Etant donné que l'acier est un matériau ferromagnétique, lorsqu'un conducteur en acier est parcouru par un courant alternatif, il se manifeste un phénomène, dit effet de peau (voir § 87). Ce phénomène consiste en ce que la résistance d'un conducteur en courant alternatif est plus grande que sa résistance en courant

continu. Pour cette raison, en partant des conditions d'échauffement admissible des fils, il faut que le courant alternatif passant par les fils et les barres soit inférieur au courant continu admissible. En plus, un conducteur d'acier branché dans un circuit à courant alternatif provoque des pertes par hystérésis (voir § 63).

L'acier est utilisé pour la fabrication de fils, de barre, de fils de mise à la terre, de rails de tramways et des chemins de fer électriques.

Pour économiser du cuivre, on emploie des conducteurs bimétalliques. La couche interne d'un conducteur bimétallique est formée par l'acier sur lequel on a porté à chaud ou par méthode galvanique une couche de cuivre. Les deux métaux forment un conducteur monolithe, où le cuivre présente 50 % du poids du fil. La résistance à la rupture d'un conducteur bimétallique est de 55 à 70 kgf/mm².

§ 33. QUELQUES MÉTAUX EMPLOYÉS EN ÉLECTROTECHNIQUE

P l o m b. C'est un métal tendre de couleur grisâtre. Se résistance à la rupture est de 1,6 kgf/mm². Le plomb résiste à l'action de l'eau, de l'acide sulfurique et de l'acide chlorhydrique. A l'air libre, le plomb se couvre d'une fine pellicule d'oxyde qui le protège contre l'oxydation ultérieure. L'acide acétique et l'acide azotique, des substances organiques putréscentes, la chaux, le béton frais exercent une action destructrice sur le plomb. Le plomb est utilisé pour la réalisation de gaines de câble et de fils, ainsi que pour la fabrication des plaques d'accumulateurs. Le plomb et ses alliages sont toxiques.

E t a i n. C'est un métal mou argenté. L'eau et l'air n'agissent pas sur lui et les acides dilués agissent très lentement. On emploie l'étain pour l'étamage du fer afin de le protéger contre la rouille (fer blanc). Des feuilles d'étain très fines (staniol) servent à la réalisation de condensateurs. L'étain fait partie des bronzes, du métal blanc, et des alliages utilisés pour la soudure.

T u n g s t è n e. C'est un métal dur argenté obtenu par traitement chimique complexe des minerais enrichis (de wolframite). On obtient ainsi une poudre de tungstène pur. Avec cette poudre on forme à la presse (la pression atteint 2 000 atm) des cubes qui sont ensuite chauffés à 700 °C.

Tableau 7

Principales caractéristiques des métaux et des alliages

Désignation	Densité, g/cm³	Température de fusion, °C	Résistance à la rupture, kgf/mm²	Résistivité, ohm·mm²/m	Coefficient thermique de résistance, 1/°C	Emplois
Acier	7,8	1400-1530	70-75	0,103-0,137	0,0057-0,006	Fils, câbles, barres, rails
Aldrey	2,7	1100	30-38	0,029-0,032	0,0036-0,0038	Fils des lignes à haute tension
Aluminium	2,69-2,7	657-660	8-25	0,026-0,028	0,00403-0,00429	Fils, câbles, barres, feuilles minces
Argent	10,5	960,5	15-30	0,016-0,0162	0,0034-0,0036	Contacts des appareils électriques
Bronze	8,3-8,9	885-1050	31-135	0,02-0,05	0,004	Contacts, ressorts, fils de contact
Cuivre	8,7-8,9	1083	27-44,9	0,0175-0,0182	0,004	Fils, câbles, barres
Etain	7,3	232	2-5	0,11-0,12	0,0043-0,0044	Soudures, feuilles minces
Fonte	7,2-7,6	1200	12-32	0,5-1,4	0,0009-0,001	Résistances pour rhéostats
Laiton	8,4-8,7	900-960	30-70	0,031-0,079	0,002	Contacts, bornes
Mercure	13,54-13,55	—38,9	—	0,958	0,009	Electrodes pour thermorégulateurs et redresseurs à vapeur de mercure
Molybdène	10,2	2570-2630	80-250	0,048-0,054	0,0047-0,005	Tubes à vide (anodes, crochets et grilles des tubes)

Désignation	Densité, g/cm³	Température de fusion, °C	Résistance à la rupture, kgf/mm²	Résistivité, ohm·mm²/m	Coefficient thermique de résistance, 1/°C	Emplois
Nickel	8,8-8,9	1452	40-70	0,07-0,079	0,006	Cathodes des tubes électroniques, anodes, grilles
Or	19,3	1063	—	0,022-0,023	0,0036	Contacts en alliages d'argent
Platine	21,4	1773	15-35	0,09-0,1	0,0025-0,0039	Couples thermoélectriques, spirales des éléments chauffants, contacts pour appareils électriques
Plomb	11,34	327,4	0,95-2,0	0,217-0,222	0,0038-0,004	Gaines de câble, éléments fusibles pour coupe-circuit, plaques d'accumulateurs
Tungstène	19,3-20,0	3370±50	100-300	0,053-0,055	0,004-0,005	Filaments des lampes à incandescence, électrodes, contacts
Zinc	7,1	419,4-430	14-29	0,05-0,06	0,0039-0,0041	Revêtements anticorrosifs, contacts

Note. Les valeurs plus grandes de la densité, de la résistance à la rupture et de la résistivité se rapportent aux métaux non recuits; les valeurs plus petites de ces caractéristiques se rapportent aux métaux recuits.

Les grains de poudre de tungstène sont frittés et on obtient du métal dense. Le tungstène est étiré pour obtenir des fils et laminé pour obtenir des feuilles. Le tungstène est le plus réfractaire des métaux, sa température de fusion est de 3370 ± 50 °C. Le tungstène métallique est largement utilisé pour la fabrication de filaments des lampes à incandescence, de tubes électroniques, d'anticathodes des tubes à rayons X, etc.

M e r c u r e. C'est un métal argenté, liquide à la température ordinaire. Il est utilisé pour la fabrication de redresseurs à vapeur de mercure, de lampes à vapeur de mercure, de contacts à mercure. Le mercure et surtout ses vapeurs sont toxiques.

Le tableau 7 réunit les principales caractéristiques des métaux et des alliages utilisés en électrotechnique.

§ 34. CHARBON

Le charbon utilisé en électrotechnique est obtenu à partir du noir de fumée, de la houille, du coke et du graphite naturel. Les matériaux utilisés pour la fabrication des articles en charbon sont broyés, classés et mélangés avec des liants (brai de houille ou verre liquide). La matière ainsi préparée passe par un manchon (pour la fabrication des électrodes en forme de tige) ou est mise dans des moules (pour la préparation des pièces en charbon de forme compliquée). Ensuite, les ébauches de charbon sont cuites sous une température allant de 800 à 3000 °C. Les balais des machines électriques servent à assurer un contact glissant entre les parties fixes et les parties mobiles des machines.

Les balais ont une surface de contact (surface appliquée au collecteur) dont les dimensions sont comprises entre 4 × 4 mm et 35 × 35 mm. La hauteur des balais est comprise entre 12 et 70 mm. L'industrie produit plusieurs sortes de balais: balais charbon-graphite (T et УГ), balais de graphite (Г), balais électrographitiques (ЭГ), balais graphite-cuivre (M et MГ), balais bronze-graphite (БГ).

§ 35. ALLIAGES À HAUTE RÉSISTANCE

Les alliages à haute résistance se divisent en trois groupes:

1. Alliages pour boîtes de résistances, différents étalons, résistances additionnelles et shunts.

2. Alliages pour résistances et rhéostats.

3. Alliages pour appareils de chauffage et fours électriques.

Les alliages du premier groupe doivent répondre aux exigences suivantes : résistivité élevée, coefficient thermique voisin de zéro, faible force thermo-électromotrice en combinaison avec d'autres métaux (surtout avec le cuivre), résistance constante avec le temps, haute tenue à la corrosion. A ce groupe appartiennent les alliages à base de cuivre, tels que la manganine et le constantan.

Manganine. La manganine est un alliage brun rougeâtre comprenant 86 % de cuivre, 12 % de manganèse et 2 % de nickel. Elle a une résistivité de 0,42 ou 0,43 ohm·mm²/m, une densité de 8,4 kg/dm³, une résistance à la rupture de 40 à 55 kgf/mm², un très faible coefficient thermique de résistance, une faible force thermo-électromotrice et une température de service admissible ne dépassant pas 60°. La manganine est le meilleur matériau pour la fabrication des boîtes de résistances, des résistances étalons et des shunts.

Constantan. C'est un alliage comprenant 60 % de cuivre et 40 % de nickel. Le constantan a une résistivité de 0,5 ohm·mm²/m, une densité de 8,9 kg/dm³ et une résistance à la rupture de 40 à 50 kgf/mm².

Il sert à la réalisation des rhéostats et des éléments chauffants si leur température de service ne doit pas dépasser 400 ou 450 °C.

Le constantan combiné avec le cuivre a une force thermo-électromotrice élevée et pour cette raison il ne peut pas être utilisé pour la fabrication des résistances étalons pour appareils de précision, car cette force électromotrice complémentaire fausserait les indications des appareils. Cette propriété du constantan est utilisée pour la fabrication des couples thermo-électriques servant à mesurer les températures de l'ordre de plusieurs centaines de degrés.

Les alliages servant à la fabrication des résistances et des rhéostats doivent être bon marché, avoir une grande résistivité et un faible coefficient thermique de résistance. A cette fin, on emploie des alliages à base de cuivre, par exemple, le constantan, la nickeline, etc.

Afin de réduire le prix on remplace le nickel par du zinc et du fer dans les alliages servant à la fabrication des rhéostats. Les alliages utilisés dans les appareils de chauffage

Désignation du matériau	Densité, g/cm³	Température de fusion, °C	Résistance à la rupture, kgf/mm²	Résistivité, ohm·mm²/m
Constantan	8,7-8,9	1200-1275	40-55 65-70	0,45-0,48 0,46-0,52
Manganin	8,14-8,4	920-960	45-55 60-70	0,42-0,48 0,43-0,5
Maillechort	8,3-8,5	1050	35-40 45-53 55-60	0,30-0,35 0,40-0,45
Nichrome (X15H60) A liage de 15% de chrome et de 60% de nickel	8,2-8,25	1380-1390	55-65	1,02-1,18
Nichrome (X20H80) Alliage de 20% de chrome et de 80% de nickel	8,4	1400	60-70	1,02-1,27
Fécral (X13IO4)	7,2-7,4	1450-1480	58-65	1,1-1,25
Nichrome (X20H80T)	8,0	1510-1520	65-70	1,02-1,17
Nichrome (X20H80T3)	8,0	1520-1530	65-75	1,18-1,36

N o t e: Les valeurs plus petites de la résistance à la rupture et de la résis
de ces caractéristiques se rapportent aux alliages durs.

des alliages à haute résistance

Coefficient thermique de résistance, 1/°C	Force thermo-électromotrice de l'alliage formant couple avec le cuivre, μV/°C	Température de service maximale, °C	Emplois
$5\cdot10^{-6}$	39-42	450-500	Rhéostats et résistances pour appareils de faible précision. Eléments chauffants à température de 400 à 450°. Electrodes combinées avec du cuivre et du fer pour couples
$(3\text{-}6)\cdot10^{-5}$	0,9-1,0	250-300	Résistances étalons, boîtes de résistances, shunts et résistances pour appareils de haute précision
$(28\text{-}30)\cdot10^{-5}$	14-16	200-250	Rhéostats
$0{,}17\cdot10^{-3}$	—	1000	Fours de laboratoire et fours industriels à température de service jusqu'à 900°
$0{,}15\cdot10^{-3}$	—	1050	Fours de laboratoire et fours industriels à température de service jusqu'à 1000°
$0{,}05\cdot10^{-3}$	—	850	Appareils électroménagers et fours industriels à température de service jusqu'à 650°
$0{,}14\cdot10^{-3}$	—	1200	Fours industriels à température de service jusqu'à 1150°
$0{,}08\cdot10^{-3}$	—	1200	Idem

tivité se rapportent aux alliages doux (fils, rubans); les valeurs plus grandes

et les fours électriques doivent être facilement usinables, avoir une grande résistance mécanique, une résistivité élevée et pouvoir fonctionner longtemps à haute température sans oxydation et leur prix ne doit pas être élevé.

Lors de l'échauffement du métal il se forme à sa surface une pellicule d'oxyde devant prévenir la dégradation ultérieure du métal. Certains métaux dont le cuivre, le fer et le cobalt ont une pellicule d'oxyde poreuse et pour cette raison, lors de l'échauffement, ils se dégradent rapidement. D'autres métaux comme le nickel, le chrome et l'aluminium se couvrent lors de l'échauffement d'une épaisse pellicule d'oxyde et pour cette raison on les utilise pour la fabrication des alliages réfractaires.

N i c h r o m e. C'est un alliage de nickel et de chrome. Le ferronichrome qui se rapporte aussi aux nichromes contient du fer en plus de nickel et de chrome (58 à 62 % de nickel, 15 à 17 % de chrome, le reste étant du fer). La densité du nichrome est de 8,4 kg/dm^3, sa résistance à la rupture est de 70 kgf/mm^2 et sa résistivité est d'environ 1,0 ohm·mm^2/m. Le nichrome est livré sous forme de fils ou de rubans utilisés pour la fabrication des spirales des appareils de chauffage et des fours dont la température de service ne dépasse pas 1000 °C.

F é c r a l. C'est un alliage comprenant 12 à 15 % de chrome, 3 à 5 % d'aluminium, le reste étant du fer. Le fécral a une densité de 7,5 kg/dm^3, une résistance à la rupture de 70 kgf/mm^2 et une résistivité d'environ 1,2 ohm·mm^2/m. La température de service du fécral est d'environ 800 °C.

C h r o m a l. C'est un alliage comprenant 28 à 30 % d'aluminium, le reste étant du fer. La résistance à la rupture du chromal est de 80 kgf/mm^2, sa résistivité est de 1,3 à 1,4 ohm·mm^2/m et sa température de service admissible est de 1250 °C.

Les caractéristiques des alliages à résistance élevée sont indiquées dans le tableau 8.

§ 36. SEMI-CONDUCTEURS

Les semi-conducteurs sont appelés ainsi parce qu'ils occupent une place intermédiaire entre les conducteurs (métaux, électrolytes, charbon), possédant une bonne conductance, et les isolateurs (porcelaine, mica, caoutchouc, etc.) qui ne laissent presque pas passer le courant électrique.

Comparons la résistivité volumique en ohm·cm de différentes substances. Alors pour les conducteurs on a: $\rho_U = 10^{-6}$ à 10^{-3} ohm·cm; les semi-conducteurs: $\rho_U = 10^{-3}$ à 10^{8} ohm·cm et les diélectriques: $\rho_U = 10^{8}$ à 10^{20} ohm·cm. Parmi les semi-conducteurs il faut noter: les oxydes métalliques (Al_2O_3, Cu_2O, ZnO, TiO_2, VO_2, WO_2, MoO_2); les sulfures (Cu_2S, Ag_2S, ZnS, CdS, HgS); les séléniures; les tellurures; certains alliages ($MgSb_2$, $ZnSb$, Mg_2Sn, $CdSb$, $AlSb$, $InSb$, $GLSb$); les éléments chimiques tels que germanium, silicium, tellure, sélénium, bore, carbone, soufre, phosphore, arsenic, ainsi qu'un grand nombre de compositions complexes (galène, carborundum, etc.).

Les propriétés des semi-conducteurs ont été étudiées par le savant soviétique A. Ioffé et ses collaborateurs.

Les propriétés électriques des semi-conducteurs diffèrent beaucoup de celles des conducteurs et des isolants. La conduction électrique des semi-conducteurs dépend dans une grande mesure de la température, de l'irradiation, de l'intensité de champ électrique, de la quantité des impuretés. A la température ordinaire il existe dans les semi-conducteurs une certaine quantité d'électrons libres, formés par suite de la rupture des liaisons électriques. Dans les semi-conducteurs on distingue deux sortes de conductibilité: la conductibilité par électrons et la conductibilité par trous (ou par lacunes).

La première est due aux électrons libres et la seconde au déplacement des liaisons privées d'électrons.

Examinons l'expérience suivante. Prenons un conducteur métallique et chauffons l'un de ses bouts. Le bout chauffé acquerra une charge positive et le bout restant froid, par conséquent, une charge négative. Ce fait s'explique par le déplacement des électrons à partir du bout chauffé vers l'autre bout, de sorte qu'au bout chaud du conducteur il se produit un manque d'électrons (charge positive) et au bout froid un excès d'électrons (charge négative). Le courant momentané qu'on observe dans le conducteur est ainsi dû à ce déplacement des électrons. C'est ce qui se passe dans un conducteur à conductibilité par électrons. Mais il existe des substances qui lors d'une telle expérience se comportent d'une façon différente: le bout chauffé d'une pareille substance acquiert une charge négative et le bout restant froid — une charge positive. Cela est possible si l'on suppose que

le transfert du courant est réalisé par des charges positives.

Nous allons examiner un autre genre de conductibilité dans les semi-conducteurs, dite conductibilité par trous. Dans les semi-conducteurs purs appelés semi-conducteurs intrinsèques, tous les électrons faiblement liés aux noyaux participent aux liaisons électroniques. La figure 47, *a* représente conventionnellement une liaison remplie entre

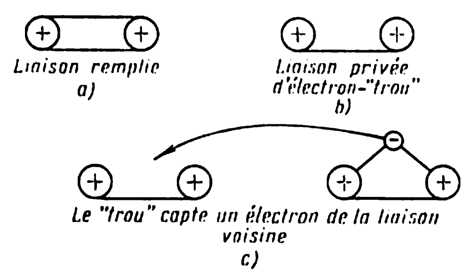


Fig. 47. Liaison entre les atomes de matière

deux atomes de substance. On appelle « trou » (ou « lacune ») un élément du réseau cristallin de la substance ayant perdu un électron, ce qui correspond à l'apparition d'une charge positive (fig. 47,*b*).

La liaison devenue libre peut de nouveau être remplie si le « trou » capte un électron de la liaison voisine (fig. 47, *c*). Cela provoquera le passage du « trou » à un nouvel endroit. Dans un semi-conducteur se trouvant dans des conditions ordinaires les transitions des électrons et l'endroit de formation d'un « trou » sont de nature chaotique. Or, si l'on applique une tension continue aux extrémités d'un semi-conducteur pur, il y aura déplacement des électrons et des « trous » (les premiers circuleront dans le sens opposé à celui des forces du champ électrique et les seconds dans le sens de ces forces). Dans le cas des semi-conducteurs purs, le nombre de « trous » apparaissant est égal au nombre d'électrons libérés et c'est pourquoi leur conductibilité est plutôt réduite (conductibilité intrinsèque). La présence même d'une faible quantité d'impuretés (semi-conducteurs extrinsèques) peut changer totalement le genre de conductibilité: elle devient soit par excès d'électrons, soit par « trous ». Examinons un exemple concret: prenons le germanium (Ge). Dans un

cristal de germanium chaque atome est lié à quatre autres atomes. En cas d'accroissement de la température ou par suite de l'irradiation, les liaisons paires d'un cristal de

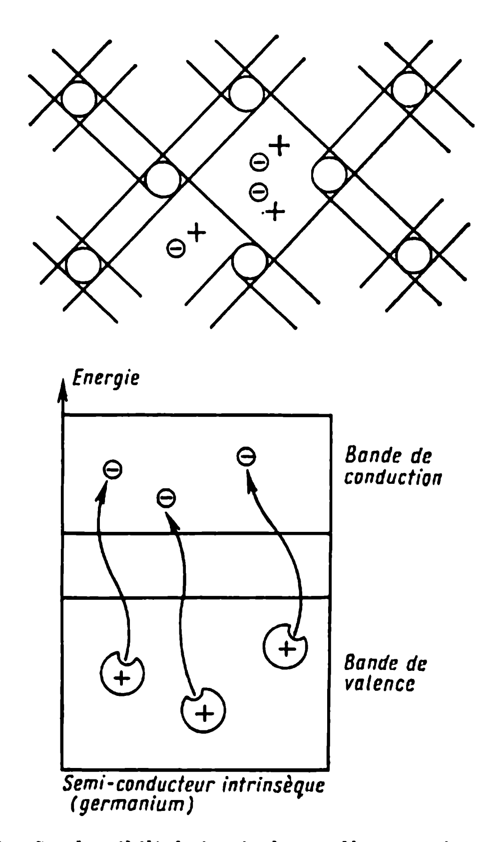


Fig. 48. Conductibilité intrinsèque d'un semi-conducteur

germanium peuvent être perturbées. Il se forme alors un nombre égal d'électrons libres et de « trous » (fig. 48).

En tant qu'impureté choisissons l'arsenic et ajoutons-le au germanium. Une telle impureté possède un grand nombre d'électrons faiblement liés. Le niveau énergétique des atomes d'impureté est disposé entre le niveau énergétique de la bande de valence et celui de la bande de conduction, plus près de la bande de valence (fig. 49). De telles

impuretés rendent aisément leurs électrons à la bande de conduction et sont appelées: *donneurs*. Ainsi le semi-conducteur aura un certain nombre d'électrons libres, tandis

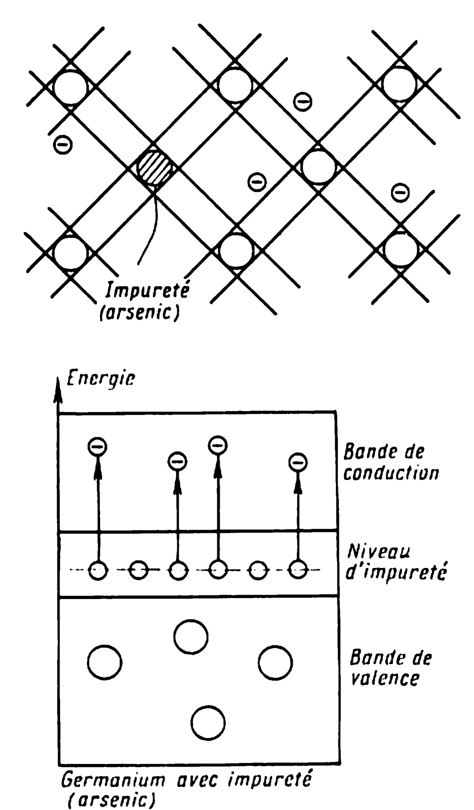


Fig. 49. Conductibilité par électrons d'un semi-conducteur

que toutes les liaisons seront remplies. La conductibilité de pareil semi-conducteur sera donc par excès d'électrons dans la bande de conduction.

Maintenant, au lieu de l'arsenic, ajoutons au germanium une autre impureté telle que l'indium. Une telle impureté possède un nombre restreint d'électrons faiblement liés et son niveau énergétique est disposé entre les niveaux énergétiques de la bande de valence et de la bande de conduction, mais cette fois plus près de la bande de conduction

(fig. 50). Les impuretés de ce genre enlèvent des électrons de la bande de valence voisine et sont appelées: *accepteurs*. Dans le semi-conducteur privé d'électrons libres il y aura ainsi des liaisons non remplies, c'est-à-dire des « trous ».

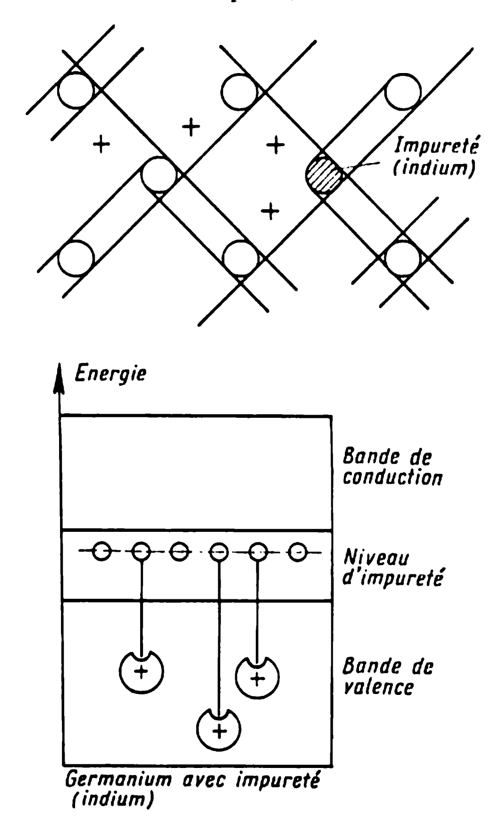


Fig. 50. Conductibilité par « trous » d'un semi-conducteur

La conductibilité de pareil semi-conducteur sera donc par défaut d'électrons (« trous ») dans la bande de valence.

Il est maintenant facile à expliquer l'expérience de l'échauffement d'un semi-conducteur, lorsque le bout chauffé acquérait une charge négative et le bout restant froid une charge positive. Sous l'effet de la chaleur, les liaisons électroniques commencent à se détruire de sorte qu'appa-

raissent des « trous » et des électrons libres. Or, si le semi-conducteur contient des impuretés capables de lier les électrons libres en formant des ions négatifs d'impureté, les « trous » commenceront à se déplacer vers le bout resté froid en lui transmettant une charge positive, et le bout chauffé du semi-conducteur prendra, par conséquent, une charge négative.

En terminant l'examen des semi-conducteurs on peut faire la conclusion suivante.

L'adjonction d'impuretés à un semi-conducteur permet d'obtenir une conductibilité dominante soit par électrons, soit par « trous ».

Les semi-conducteurs à conductibilité par excès d'électrons sont appelés semi-conducteurs type *n* (négatifs) et ceux qui sont à conductibilité par défaut d'électrons (par « trous ») sont appelés semi-conducteurs type *p* (positifs).

Problèmes

1. Calculer la résistance d'un fil de fer ayant la longueur de 100 m et le diamètre de 1 mm.

2. Quelle est la résistance d'un fil d'aluminium dont la section est de 2,5 mm² et la longueur de 300 m ?

3. Il faut réaliser un rhéostat de 20 ohms avec du fil de nickéline. Calculer la section du fil si sa longueur est de 5 m.

4. La résistance de la spirale d'un réchaud électrique est de 24 ohms. Quelle doit être la longueur du fil de nichrome pour cette spirale si sa section est de 0,5 mm² ?

5. Un fil métallique de 200 m de longueur et de 4 mm² de section a une résistance de 6,5 ohms. Déterminer le matériau dont est fait ce conducteur.

6. La longueur d'un conducteur de tungstène est de 25 cm. Calculer la section du conducteur si sa résistance est de 0,05 ohm.

7. Calculer la résistance d'un fil télégraphique en fer de 4 mm de diamètre et de 150 km de longueur.

8. La conductance d'un fil de nichrome long de 80 m est de $0{,}025 \ \frac{1}{\text{ohm}}$. Déterminer la section du fil.

9. Calculer la température de l'enroulement en fil de cuivre d'une machine électrique, si avant la mise en marche de la machine la résistance de l'enroulement à 15 °C était de 70 ohms et pendant le travail elle est devenue égale à 85,05 ohms.

10. La spirale en nichrome d'un réchaud électrique est parcourue par un courant de 5 A. La section du fil est de 0,6 mm². Calculer la longueur du fil si le réchaud est prévu pour être branché sur le secteur de 120 V.

11. Une bobine en fil de cuivre de 0,5 mm² de section et de 200 m de longueur est parcourue par un courant de 4 A. Quelle est la tension aux bornes de cette bobine ?

12. Pour le fonctionnement stable d'une lampe à arc il faut une tension de 60 V, le courant étant de 10 A. L'arc est alimenté par une génératrice débitant sous une tension de 120 V. Calculer la valeur de la résistance additionnelle à brancher en série avec l'arc, si la résistance des fils de connexion est de 0,2 ohm.

13. Un voltmètre est prévu pour une tension de 20 V et son enroulement est alors parcouru par un courant de 0,05 A. Pour pouvoir brancher ce voltmètre sur un secteur de 100 V il faut connecter en série avec lui une résistance additionnelle. Calculer la valeur de cette résistance.

14. Un circuit alimenté sous la tension de 60 V est parcouru par un courant de 2,5 A. Quelle résistance additionnelle doit-on brancher dans ce circuit pour qu'il soit parcouru par un courant de 2 A ?

15. Une génératrice débite sous une tension de 50 V. Dans le circuit est branchée une résistance de 3 ohms. Chacun des fils d'alimentation a une résistance de 1 ohm. Parallèlement à la première résistance est branchée une autre résistance de 2 ohms par l'intermédiaire de fils de connexion de 1 ohm chacun. Parallèlement à la deuxième résistance est branchée une troisième résistance de 4 ohms par l'intermédiaire des fils de connexion ayant aussi une résistance de 1 ohm chacun (fig. 51). Quelles seront les indications du voltmètre branché aux bornes de chaque résistance (aux points $A - B$, $C - D$, $E - F$) ?

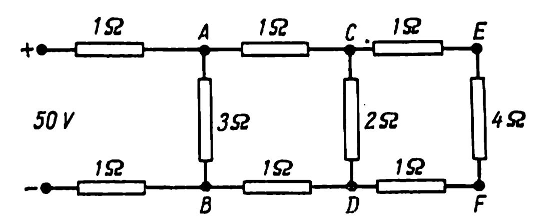


Fig. 51. Schéma pour l'exemple 15

16. Un circuit électrique comprend des fils de connexion de 0,4 ohm, une lampe électrique de 150 ohms et un rhéostat de 120 ohms. Quelle est la résistance totale du circuit si les fils, la lampe et le rhéostat sont branchés en série ?

17. Quatre conducteurs de 3, 4, 6 et 2 ohms sont branchés en parallèle. Calculer la résistance équivalente de ces conducteurs.

18. Calculer la résistance d'un fil de cuivre long de 800 m et comportant 7 brins de 1,7 mm de diamètre chacun.

19. Un fil de fer de 20 m de longueur et de 1,5 mm² de section, un fil d'aluminium de 50 m de longueur et de 2 mm² de section et un fil de nichrome de 10 m de longueur et de 0,5 mm² de section sont branchés en série. Déterminer la résistance totale de ces fils.

20. La première branche d'une association en parallèle comprend une résistance de 18 ohms. La seconde branche comprend trois résistances de 12 ohms chacune branchées en série. Calculer la résistance équivalente de l'ensemble.

21. Huit conducteurs de 10 ohms chacun forment quatre groupes identiques connectés en parallèle. Calculer la résistance équivalente du circuit.

22. Un conducteur de 7 ohms est branché en série avec un ensemble comprenant quatre conducteurs de 2, 4, 6 et 8 ohms connectés en parallèle. Calculer la résistance équivalente du circuit.

23. Un circuit de trois résistances de 3, 8 et 6 ohms branchées en parallèle est connecté en série avec un autre circuit comprenant quatre résistances de 2, 7, 6 et 3 ohms associées en parallèle. Calculer la résistance équivalente de l'ensemble.

24. Trois conducteurs sont couplés en parallèle. La résistance du premier conducteur est de 3 ohms, celle du deuxième est de 4 ohms et celle du troisième est de 6 ohms. Le courant parcourant le premier conducteur est de 2 A. Calculer le courant total.

25. La tension du secteur est de 12 V. Le courant total absorbé par 4 lampes identiques branchées en parallèle est de 8 A. Déterminer la résistance de chaque lampe.

26. Un groupe de trois conducteurs de 2,9 et 6 ohms branchés en parallèle est réuni en série avec un autre groupe de quatre conducteurs branchés en parallèle et ayant les résistances de 2, 4, 6 et 3 ohms. La tension du secteur est de 30 V. Calculer le courant dans chaque conducteur.

27. La tension d'une génératrice est de 110 V. Sur le réseau sont branchées en parallèle quarante lampes de 200 ohms chacune. Déterminer la force électromotrice de la génératrice si sa résistance interne est de 0,2 ohm.

28. Un montage comprend quatre résistances de 6, 4, 3 et 8 ohms associées en parallèle. Le courant total est de 20 A. Calculer le courant circulant dans chaque résistance.

29. Un moteur électrique de 120 V absorbant un courant de 25 A est installé à une distance de 200 m de la source d'énergie. Calculer la section des fils de cuivre allant vers le moteur si la tension de la source d'énergie est de 125 V.

30. La longueur d'une ligne de transport est de 300 m. La ligne est en fil de cuivre de 150 mm² de section. Le courant absorbé par l'usine est de 200 A. Quelle est la tension qui arrive à l'usine si la tension à la sortie de la centrale électrique est de 240 V ?

31. Calculer la quantité d'énergie électrique absorbée par un four électrique pendant 30 minutes, si le courant absorbé est de 10 A sous la tension de 120 V.

32. Le culot d'une lampe à incandescence porte l'inscription suivante : 200 W, 220 V. Quelle est la résistance de son filament ?

33. La puissance d'un moteur électrique est de 3 kW. Quelle est l'intensité du courant dans l'enroulement de ce moteur si la tension du réseau est de 120 V ?

34. Un moteur électrique branché sur un réseau de 220 V absorbe un courant de 8 A. Calculer le travail fourni par le courant pendant 2 h 30 mn et la puissance du moteur.

35. Dans un appartement sont installées six lampes. Deux lampes de 40 W chacune sont allumées 5 h par jour, deux lampes de 60 W chacune sont allumées 6 h par jour et deux lampes de 15 W chacune sont allumées 4 h par jour. Quelle est la somme à payer pour l'énergie consommée par toutes les lampes pendant un mois (trente jours), le prix de 1 kWh étant de 4 copecks ?

36. Un moteur électrique de 5 kW alimenté sous 110 V entraîne une scie. Le moteur est alimenté par une génératrice se trouvant à 150 m du moteur. La tension aux bornes de la génératrice est de 120 V,

Calculer : a) la section des fils de cuivre allant de la génératrice vers le moteur, b) la puissance de la génératrice, c) la perte de puissance dans les fils.

37. Dans une centrale électrique est installée une génératrice de 240 V. L'énergie est fournie à un récepteur situé à une distance de 200 m. Ce dernier absorbe un courant de 60 A. La perte de puissance dans les fils est égale à 10 % de la puissance transmise. Calculer la section des fils de cuivre de la ligne.

38. Une génératrice fournissant un courant de 900 A sous la tension de 6 V à une installation de galvanostégie est entraînée par un moteur à essence. Calculer la puissance de ce moteur en chevaux-vapeur, si le rendement de la partie électrique de l'installation est de 95%.

39. Une génératrice de 10 kW débite sous une tension de 115 V. L'énergie est transmise par des fils d'aluminium de 95 mm^2 de section et de 250 m de longueur. Calculer la puissance reçue par le récepteur.

Questions de contrôle

1. Qu'est-ce que la résistance électrique ?
2. De quoi dépend la résistance électrique ?
3. Ex quelles unités mesure-t-on la résistance électrique ?
4. Qu'est-ce que la résistivité ?
5. Comment calcule-t-on la résistance d'un conducteur lorsqu'on connaît sa longueur, sa section et le matériau dont il est fait ?
6. Qu'est-ce que la conductibilité électrique ?
7. Comment s'énonce la loi d'Ohm pour une portion de circuit et quelle est sa formule ?
8. Comment peut-on calculer la chute de tension dans les fils lorsqu'on connaît leur résistance et le courant qui les parcourt ?
9. Comment s'énonce la loi d'Ohm pour le circuit entier et quelle est sa formule ?
10. Qu'est-ce qu'un court-circuit, quelles sont ses conséquences et comment le prévenir ?
11. Comment réalise-t-on la connexion des conducteurs en parallèle ?
12. Comment réalise-t-on la connexion des conducteurs en série ?
13. Comment s'énonce la première loi de Kirchhoff ?
14. Comment réalise-t-on la connexion mixte des conducteurs ?
15. Comment s'énonce la deuxième loi de Kirchhoff ?
16. D'après quels effets peut-on juger du travail d'un courant électrique ?
17. En quelles unités mesure-t-on le travail du courant électrique ?
18. Qu'est-ce que la puissance électrique, avec quel appareil peut-on la mesurer et en quelles unités ?
19. Comment peut-on déterminer la puissance lorsqu'on ne dispose pas d'un wattmètre ?

CHAPITRE III

ACTIONS CHIMIQUES DU COURANT. PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES ET ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES

§ 37. ÉLECTROLYSE

Parmi les conducteurs du courant électrique, en plus des métaux, de leurs alliages et du charbon il faut nommer les solutions d'acides, de bases et de sels. Lorsque le courant passe par un conducteur métallique, il ne se produit pas de changement dans la substance de ce dernier. Le courant électrique dans de tels conducteurs est dû au mouvement des électrons libres le long du conducteur.

Par contre, en passant par des conducteurs liquides, le courant les décompose en éléments constituants. Pour cette raison, les liquides sont appelés conducteurs de second genre ou électrolytes à la différence des conducteurs métalliques appelés conducteurs de premier genre. La décomposition des électrolytes sous l'action du courant électrique est connue sous le nom d'*électrolyse*.

L'électrolyse a lieu dans les bains galvaniques. Un bain galvanique est formé par un récipient rempli de liquide, (d'électrolyte) qui est décomposé par le courant.

Dans le récipient contenant l'électrolyte on plonge deux plaques (en charbon, par exemple) qui forment les électrodes. Connectons le pôle négatif de la source de courant continu à l'une des électrodes (cathode) et le pôle positif à l'autre électrode (anode) et fermons le circuit. Le phénomène d'électrolyse est accompagné du dégagement de substance aux électrodes. Les expériences montrent que l'hydrogène et les métaux se dégagent toujours à la cathode. Il en résulte que le courant dans des conducteurs liquides est dû au mouvement des atomes de l'électrolyte.

Voyons maintenant qu'est-ce que le courant dans les électrolytes?

Selon la théorie moderne. lorsqu'une molécule neutre de substance se trouve dans un solvant elle se dissocie

en ions portant des charges égales et de signes contraires. Ceci s'explique par le fait que dans un milieu à permittivité ε la force d'interaction des charges devient ε fois plus faible (voir la formule de Coulomb). Ainsi, dans un solvant à grande permittivité (par exemple, dans l'eau, où $\varepsilon = 81$) les forces de liaison des molécules s'affaiblissent et les

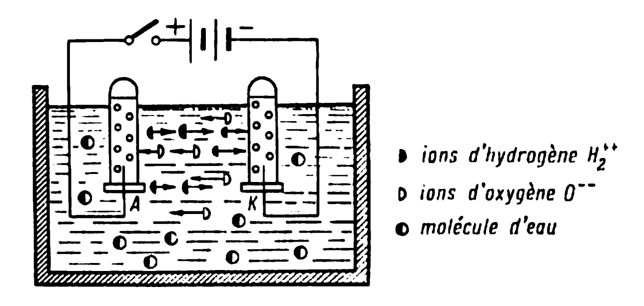


Fig. 52. Electrolyse de l'eau

chocs dus au mouvement thermique des molécules sont alors suffisants pour qu'elles commencent à se dissocier en ions.

Parallèlement à la dissociation moléculaire dans les électrolytes a lieu le processus inverse, c.-à-d. celui de la réunion des ions en molécules neutres.

Les acides se dissocient en ions d'hydrogène à charge positive et en ions de radical acide à charge négative:

$$HCl \rightleftarrows H^+ + Cl^-$$

$$HNO_3 \rightleftarrows H^+ + NO_3^-$$

$$H_2SO_4 \rightleftarrows 2H^+ + SO_4^{--}$$

Les bases se dissocient en ions de métal et en ions d'hydroxyle OH^-.

$$NaOH \rightleftarrows Na^+ + OH^-$$

$$KOH \rightleftarrows K^+ + OH^-$$

$$Ba(OH)_2 \rightleftarrows Ba^{++} + 2OH^-$$

Les sels se dissocient en ions de métal et en ions de radical acide :

$$NaCl \rightleftarrows Na^+ + Cl^-$$

$$KNO_3 \rightleftarrows K^+ + NO_3^-$$

$$CuSO_4 \rightleftarrows Cu^{++} + SO_4^{--}.$$

Lorsqu'on applique aux électrodes une tension continue, entre les électrodes se forme un champ électrique. Les ions de charge positive se déplaceront alors vers la cathode et les ions de charge négative se déplaceront vers l'anode. En atteignant les électrodes, les ions se neutralisent. Examinons l'électrolyse de l'eau (fig. 52).

Electrolyse de l'eau. L'eau sert d'électrolyte. Pour élever sa conductibilité, on y ajoute un peu d'acide, de base ou de sel. Le passage du courant par le bain est accompagné par le dégagement de bulles de gaz sur les deux électrodes *A* et *K*. Si l'on dispose maintenant au-dessus des électrodes des éprouvettes renversées remplies d'eau on remarquera que l'eau y est progressivement chassée par les bulles de gaz. Aussi l'éprouvette recouvrant la cathode *K* est-elle deux fois plus vite remplie de gaz que celle de l'anode *A*. Si on soulève la première éprouvette (sans la retourner) et on en approche une allumette enflammée, le gaz qui la remplit se met à brûler avec une lueur bleuâtre et on entend un faible claquement. Cette éprouvette est donc remplie d'hydrogène.

Si on approche une allumette de l'éprouvette recouvrant l'anode, elle se met à brûler d'une lumière vive et cela prouve que l'éprouvette est remplie d'oxygène.

Cette expérience montre que l'eau est une composition chimique de deux gaz, de l'oxygène et de l'hydrogène.

Electrolyse du sulfate de cuivre. Versons dans un récipient une solution de sulfate de cuivre et plongeons deux plaques de charbon qui joueront le rôle d'électrodes. Les molécules de sulfate de cuivre se dissocient en ions: Cu^{++} et SO_4^{--}. Connectons aux électrodes une source de tension continue. Les ions se dirigeront vers les électrodes correspondantes. Lorsqu'un ion de Cu^{++} atteint la cathode, celle-ci lui transmet deux électrons et il se dépose sur la plaque de charbon sous forme d'une molécule neutre de cuivre. Lorsqu'un ion de SO_4^{--} touche l'anode, il lui transmet les deux électrons excédentaires et se transforme en une molé-

cule neutre et instable SO_4 qui se dissocient en SO_3 et O. L'oxygène est dégagé à l'anode et SO_3, en se combinant avec l'eau, forme une molécule d'acide sulfurique:

$$SO_3 + H_2O = H_2SO_4.$$

Au fur et à mesure, la quantité de cuivre se déposant sur la cathode augmente et la quantité de cuivre dans la solution diminue. Si l'on remplace l'anode de charbon par une plaque de cuivre, SO_4 se dégage sur l'anode et il se produit une réaction secondaire entre SO_4 et la substance de la plaque. On a

$$SO_4 + Cu = CuSO_4.$$

Dans ce cas, la concentration de la solution ne change pas, mais l'accumulation du cuivre sur la cathode est accompagnée de la dissolution de l'anode de cuivre.

On voit donc que le courant électrique dans les électrolytes est dû au mouvement des particules chargées de la matière, des ions. Ainsi, les conducteurs métalliques possèdent une conductibilité électronique et les électrolytes ont une conductibilité ionique.

Dans les conducteurs du second genre, de même que dans les conducteurs du premier genre, il existe une relation entre la tension (la différence de potentiel) et le courant exprimée par la loi d'Ohm.

§ 38. PREMIÈRE LOI DE FARADAY

Le phénomène d'électrolyse a été étudié par Faraday. Il a établi que la quantité de substance se dégageant aux électrodes lors de l'électrolyse est proportionnelle au courant et à la durée de son passage, autrement dit, à la quantité d'électricité ayant traversé l'électrolyte.

C'est la première loi de Faraday.

Un courant de mêmes intensité et durée dans différents électrolytes fait dégager aux électrodes des quantités différentes de substance. On appelle *équivalent électrochimique* la quantité de substance en milligrammes dégagée à l'électrode par un courant de 1 A pendant une seconde. Il est désigné par la lettre α.

L'équivalent électrochimique peut être déterminé expérimentalement. Soit un bain galvanique à solution de sulfate de cuivre. La pesée précise de la plaque cathodique

avant l'expérience a montré que son poids était, par exemple, de 50 g. Connectons une source de courant et réglons dans le circuit un courant $I = 3$ A. Au bout de 30 minutes on coupe le courant et on pèse de nouveau la plaque cathodique. Grâce au cuivre déposé son poids est devenu 51,7766 g.

Ainsi, un courant de 3 A durant 30 minutes (1800 secondes) a dégagé une quantité de cuivre égale à 51,7766 — — 50 = 1,7766 g ou 1776,6 mg. Un courant de 1 A aurait dégagé pendant une seconde:

$$\frac{1776,6}{1800 \cdot 3} = 0,329 \text{ mg de cuivre.}$$

De cette façon on a déterminé expérimentalement l'équivalent électrochimique du cuivre.

En réalisant de semblables expériences avec différents électrolytes on peut déterminer les équivalents électrochimiques des autres substances. Les équivalents électrochimiques de certaines substances sont:

Aluminium	0,0936	Argent	1,118
Fer	0,289	Mercure	2,072
Or	0,681	Nickel	0,304
Cuivre	0,329	Hydrogène	0,0104
Plomb	1,072	SO_4	0,4975
Zinc	0,3387		

La première loi de Faraday s'exprime par la formule:

$$M = \alpha It \text{ ou } M = \alpha Q,$$

où M est la quantité de substance en mg;
α est l'équivalent électrochimique;
I est l'intensité en ampères;
t est le temps en secondes;
Q est la quantité d'électricité en coulombs.

Exemple 1. Calculer la quantité de nickel métallique dégagé à la cathode par un courant de 5 A pendant 20 minutes. L'électrolyte est une solution de sulfate de nickel.

$$I = 5\text{A};\ t = 20 \text{ mn} = 1200 \text{ s};\ \alpha = 0,304;\ M = ?$$

$$M = \alpha It = 0,304 \cdot 5 \cdot 1200 = 1824 \text{ mg.}$$

On notera que la quantité de substance dégagée lors de l'électrolyse ne dépend pas de la forme du récipient, de la concentration de la solution, ou de la température, etc.

§ 39. DEUXIÈME LOI DE FARADAY

D'après le cours de chimie on sait que l'équivalent chimique (m) d'une substance est le rapport du poids atomique A à la valence (n):

$$m=\frac{A}{n}.$$

Or, si l'on calcule le rapport de l'équivalent électrochimique d'une substance à son équivalent chimique, on obtient pour toutes les substances le même nombre qui est de 0,01036 (tableau 9).

Tableau 9

Relation entre les équivalents électrochimique et chimique d'une substance

Substance	Equivalent électro-chimique, a	Poids atomique, A	Valence, n	Equivalent chimique, m	Rapport $\frac{a}{m}$
Hydrogène	0,0104	1,008	1	1,008	0,01036
Argent	1,118	107,88	1	107,88	0,01036
Nickel	0,304	58,68	2	29,34	0,01036
Aluminium	0,0936	27,1	3	9,03	0,01036
SO_4	0,4975	96,07	2	48,03	0,01036

La deuxième loi de Faraday établit la proportionnalité entre l'équivalent électrochimique et l'équivalent chimique.

En se servant de la deuxième loi de Faraday, on peut calculer l'équivalent électrochimique d'une substance.

Exemple 2. Calculer l'équivalent électrochimique du zinc, sachant que son poids atomique est de 65,37 et sa valence est égale à 2.

$$A=65{,}37;\ n=2;\ \alpha=?$$

L'équivalent chimique:

$$m=\frac{A}{n}=\frac{65{,}37}{2}=32{,}68;$$

$$\alpha=0{,}01036\cdot 32{,}68=0{,}3387.$$

La deuxième loi de Faraday indique quelles sont les propriétés dont dépend la valeur de l'équivalent électrochimique de la substance:

$$\alpha=0{,}01036\,\frac{A}{n}.$$

On sait d'après le cours de chimie, qu'on appelle gramme-équivalent d'une substance le nombre de grammes égal à l'équivalent chimique de cette substance. Ainsi, l'équivalent chimique de l'argent est 107,88. Le gramme-équivalent de l'argent est donc 107,88 g.

Un coulomb d'électricité passant par une solution d'azotate d'argent dégage 1,118 mg d'argent. Pour obtenir 107,88 g d'argent il faut $107{,}88 \cdot 1000 : 1{,}118 = 96\,500$ C. La même quantité d'électricité est nécessaire pour faire dégager 1,008 g d'hydrogène, 29,34 g de nickel, 9,03 g d'aluminium, etc. Il en résulte que pour libérer lors de l'électrolyse un gramme-équivalent d'une substance quelconque il faut 96 500 C. Ce nombre est appelé constante de Faraday. Par différentes expériences, on a établi qu'un gramme-équivalent d'une substance monovalente quelconque contient $6{,}06 \cdot 10^{23}$ atomes. Ainsi, 1,008 g d'hydrogène et 107,88 g d'argent contiennent le même nombre d'atomes. Un gramme-équivalent d'une substance bivalente contient deux fois moins d'atomes et un gramme-équivalent d'une substance trivalente contient trois fois moins d'atomes qu'un atome d'une substance monovalente.

Si pour libérer un gramme-équivalent de substance il faut 96 500 C et chaque gramme-équivalent contient $6{,}06 \cdot 10^{23}$ atomes, chaque atome de substance porte donc une charge

$$e = \frac{96500}{6{,}06 \cdot 10^{23}} = 16 \cdot 10^{-20}\mathrm{C}.$$

Une molécule neutre de sel de cuisine (NaCl) placée dans une solution sera dissociée en un ion positif de sodium Na ayant une charge $+e = 16 \cdot 10^{-20}$ C et en un ion négatif de chlore Cl portant une charge $-e = 16 \cdot 10^{-20}$ C. Une molécule de chlorure de zinc $ZnCl_2$ se dissociera pour former un groupe de deux atomes de chlore à charge négative $-2e = 2 \cdot 16 \cdot 10^{-20}$ C et un ion de zinc à charge positive $+2e = 2 \cdot 16 \cdot 10^{-20}$ C.

Un ion d'hydrogène ayant perdu un électron aura une charge positive $e = 16 \cdot 10^{-20}$ C. Pour cette raison, le nombre $16 \cdot 10^{-20}$ C représente une charge électrique élémentaire, la valeur de la charge d'un électron ou d'un proton.

Chaque élément n-valent qui se transforme en un ion perd ou acquiert n électrons. De cette façon, le phénomène de l'électrolyse confirme la théorie électronique.

§ 40. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'ÉLECTROLYSE

L'électrolyse est largement utilisée dans la technique, par exemple, dans les domaines suivants:

1. Revêtement des métaux par une couche d'un autre métal par électrolyse (galvanostégie).

Pour protéger les métaux contre l'oxydation ainsi que pour améliorer leur résistance mécanique et leur présenta-

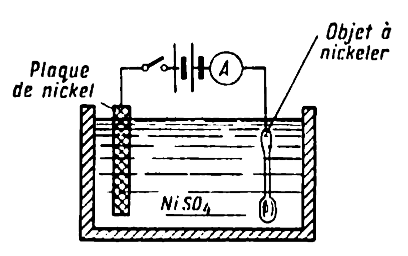


Fig. 53. Galvanostégie

tion on les couvre d'une fine couche de métaux nobles (or, argent) ou de métaux pratiquement inoxydables (chrome, nickel).

L'objet qui doit être galvanisé est décapé et poli. On lui enlève toute trace de graisse et on le plonge ensuite en tant que cathode dans un bain galvanique. L'électrolyte utilisé est une solution saline du métal employé pour le revêtement. L'anode est une plaque du même métal. La figure 53 représente un bain pour nickelage. L'électrolyte utilisé est une solution aqueuse d'une substance contenant du nickel (par exemple, sulfate de nickel $NiSO_4$), et l'objet à traiter sert de cathode. L'intensité du courant dans le bain dépend de la surface à traiter. Généralement, pour le nickelage, la densité de courant est égale à 0,4 A/dm^2. Afin d'obtenir un revêtement uniforme on place l'objet entre deux plaques anodiques. La galvanisation terminée, on sort l'objet du bain, on le sèche et on le polit.

2. Obtention de copies des objets par électrolyse (galvanoplastie).

Pour obtenir des copies des objets métalliques (pièces de monnaie, médailles, bas-reliefs, etc.), on fait un moule en matériau plastique (par exemple, en cire). Afin de rendre le moule conducteur on le couvre de graphite pulvérisé,

on le plonge dans le bain en tant que cathode et on obtient dessus la couche de métal d'épaisseur requise. Ensuite, on ôte la cire, en chauffant la copie obtenue.

La galvanoplastie est à la base de la production des disques de musique (fig. 54). La plaque de cire portant l'enregistrement est couverte d'une fine poussière d'or (bon conducteur) et, ensuite, est plongée en qualité de cathode dans une solution de sulfate de cuivre. Grâce à l'anode de cuivre, la concentration de la solution est constante. La copie négative en relief sert à estamper un grand nombre de disques.

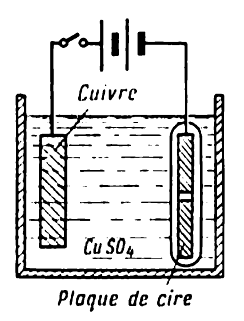


Fig. 54. Galvanoplastie

3. Raffinage des métaux.

Grâce à sa bonne conductibilité le cuivre est le conducteur le plus utilisé en électrotechnique. Les minerais de cuivre contiennent beaucoup d'impuretés, par exemple du fer, du soufre, de l'antimoine, de l'arsenic, du bismuth, du plomb, du phosphore, etc. Le procédé permettant d'obtenir du cuivre à partir du minerai est le suivant: on broie d'abord le minerai et on le fait griller dans des fours spéciaux où certaines composantes brûlent et où le cuivre se transforme en oxyde de cuivre qu'on fait fondre avec du charbon de nouveau dans le four. Un processus de réduction a lieu et on obtient un produit appelé cuivre noir contenant 98 à 99 % de cuivre. La pureté du cuivre utilisé dans l'électrotechnique doit être grande, toute impureté diminuant la conductibilité. On obtient un tel cuivre à partir du cuivre noir par raffinage électrolytique.

Le cuivre brut est suspendu en tant qu'anode dans un bain contenant une solution de sulfate de cuivre (fig. 55). La cathode est une feuille de cuivre pur. Lors du passage du courant par le bain, le cuivre de l'anode passe dans la solution et ensuite se dépose sur la cathode. Le cuivre électrolytique contient jusqu'à 99,95 % de cuivre. On utilise le cuivre pour la fabrication de fils nus ou isolés, de câbles pour courants forts et faibles, d'enroulements de machines électriques et de transformateurs, de barres, de rubans, de tiges, de lames de collecteurs, de pièces de machines et d'appareils.

Après le cuivre, l'aluminium occupe la deuxième place dans les applications électrotechniques. La bauxite comprenant jusqu'à 70 % d'oxyde d'aluminium, ainsi que l'oxyde de silicium et l'oxyde de fer, est la matière première utilisée pour l'obtention de l'aluminium. Après le traitement de la bauxite avec de l'alcali on obtient l'alumine (Al_2O_3).

Afin de diminuer le point de fusion on ajoute certaines substances à l'alumine. Ensuite, elle est chargée dans un four réfractaire dont les parois et le fond sont recouverts

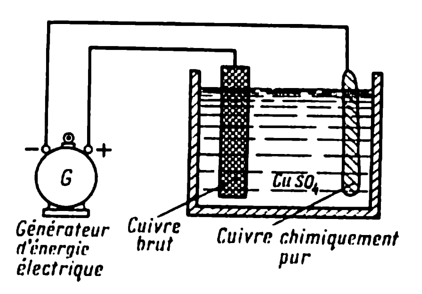


Fig. 55. Raffinage du cuivre

de plaques de charbon connectées au pôle négatif de la source de tension. Par le couvercle du four passe une tige de charbon servant d'anode. On plonge l'anode dans le four, ce qui provoque l'amorçage d'un arc électrique faisant fondre l'alumine. Ensuite a lieu l'électrolyse de la masse fondue. L'aluminium pur s'accumule sur le fond du récipient d'où il est coulé dans des moules. La teneur en aluminium du métal atteint 99,5 %. La production de l'aluminium exige beaucoup d'énergie électrique. Pour cette raison, les usines d'aluminium sont généralement construites près des centrales hydro-électriques produisant l'énergie à bas prix.

L'aluminium est utilisé en électrotechnique pour la fabrication de fils, de câbles et de différents alliages.

§ 41. PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES

Les piles sont des sources de tension continue. On les appelle piles primaires. L'énergie électrique produite dans ce cas est obtenue grâce aux réactions chimiques ayant lieu à l'intérieur de la pile. Considérons le principe de

fonctionnement d'une pile simple. Elle se compose (fig. 56) d'un récipient contenant une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) dans laquelle sont plongées une plaque de zinc et une plaque de cuivre. L'expérience montre que le zinc se charge négativement et le cuivre positivement. La pile comporte deux sorties: les pôles positif (anode) et négatif (cathode).

Une plaque de zinc plongée dans une solution d'acide sulfurique s'y dissout. Il s'ensuit de la propriété du zinc de livrer facilement ses électrons qu'un atome de zinc,

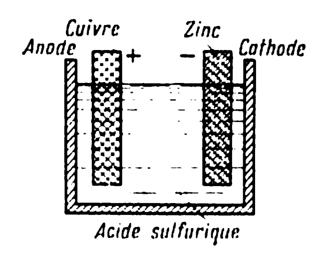


Fig. 56. Pile hydro-électrique simple

en laissant deux électrons à la plaque (métal bivalent), passe dans la solution sous forme d'ion positif. Il s'établit alors entre la plaque de zinc et la solution une certaine différence de potentiel arrêtant la dissolution ultérieure de la plaque de zinc. Si l'on plonge dans la solution d'acide sulfurique une deuxième plaque de zinc, il se passera la même chose. Les deux plaques acquerront le même potentiel de sorte que la différence de potentiel sera nulle. Mais plongeons dans la solution une plaque de cuivre. Sa solubilité étant plus faible, le cuivre aura par rapport à la solution une différence de potentiel distincte de celle du zinc. Entre la plaque de cuivre et celle de zinc apparaît alors une différence de potentiel.

La différence de potentiel (la F.É.M) entre les plaques (les électrodes) est égale à 1,1 V.

Lorsqu'on réunit les pôles de la pile par un conducteur métallique, les électrons passent de la plaque de zinc sur la plaque de cuivre. Par suite de la perte d'électrons, le potentiel entre la plaque de zinc et la solution diminue et une nouvelle portion d'ions de zinc passe de la plaque dans la solution, tandis que la plaque elle-même reçoit

une nouvelle portion d'électrons. En pénétrant dans la solution, les ions positifs de zinc se combinent avec les ions négatifs du radical acidé SO_4^{--} et forment une molécule de sulfate de zinc $ZnSO_4$.

Les ions positifs d'hydrogène H_2^+ se dirigent vers la plaque de cuivre, en lui prenant les électrons libres, et en se neutralisant se dégagent sous forme de bulles de gaz recouvrant la plaque de cuivre.

Ainsi, lors du fonctionnement de la pile, la plaque de zinc se dissout dans l'acide et est recomplétée en électrons, tandis que la plaque de cuivre livre ses électrons aux ions d'hydrogène en conservant sa charge positive. Dans la partie extérieure du circuit les électrons se dirigent de la plaque de zinc vers la plaque de cuivre, tandis que dans l'électrolyte les ions négatifs se déplacent vers la plaque de zinc et les ions positifs, de la plaque de zinc vers celle de cuivre. Les indications d'un ampèremètre branché dans le circuit d'une pile cuivre-zinc en fonctionnement diminuent rapidement. Ceci s'explique par le fait que la plaque de cuivre forme avec l'hydrogène qui la recouvre un couple particulier, pour ainsi dire une sorte de pile, dont la F.É.M. est opposée à celle de la pile elle-même. Ce phénomène est appelé *polarisation*. Par suite de sa forte polarisation la pile cuivre-zinc n'est pas employée. Parmi les piles où la polarisation est pratiquement absente notons la pile charbon-zinc. Ses électrodes sont respectivement faites en charbon et en zinc et l'électrolyte est une solution de chlorure d'ammonium (NH_4Cl). La tige de charbon est placée dans un sachet contenant du bioxyde de manganèse (MnO_2) neutralisant la polarisation (dépolarisant). La F.É.M. de la pile est de 1,45 V. Lors du fonctionnement de la pile charbon-zinc entre l'hydrogène se dégageant de la solution et le bioxyde de manganèse a lieu la réaction suivante:

$$MnO_2 + 2H = MnO + H_2O.$$

On obtient de l'eau et la pile n'est pas polarisée.

Les piles charbon-zinc sont souvent fabriquées sous forme des piles sèches.

La figure 57 représente une pile sèche avec dépolarisant de manganèse. La pile est placée dans une boîte de zinc *1* qui constitue, en même temps, le pôle négatif de la pile. La boîte est recouverte de carton. Au centre de la boîte

se trouve une tige de charbon *2* qui est le pôle positif de la pile. La tige de charbon est entourée du dépolarisant *3*. Le dépolarisant se trouve dans un sachet en toile et est un mélange de grains broyés de bioxyde de manganèse, de graphite et de noir de fumée imbibés d'une solution de chlorure d'ammonium. Pour isoler le dépolarisant du zinc on prévoit sur le fond de la boîte une cale en carton *4*.

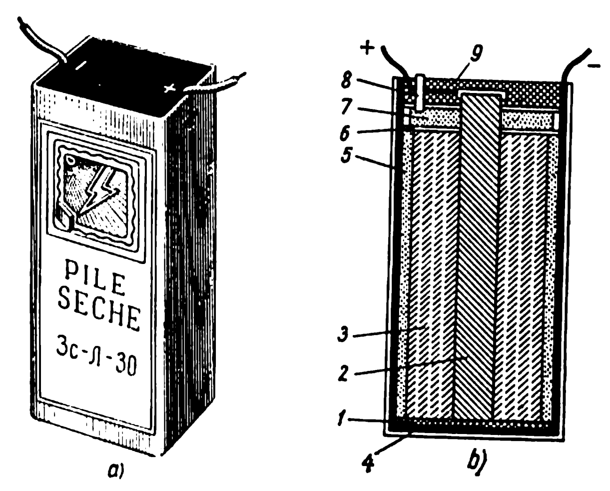


Fig. 57. Pile charbon-zinc à dépolarisant:
a — vue extérieure d'une pile sèche; *b* — coupe d'une pile sèche

Le sachet avec dépolarisant est entouré de pâte *5* (farine imprégnée d'une solution de chlorure d'ammonium). Pour empêcher que la pâte ne se gâte et ne devienne sèche, elle comprend aussi du chlorure de zinc. Le sachet avec dépolarisant est couvert d'une garniture de carton *6*, puis on a une couche de sciures *7* également couverte d'une garniture de carton.

La boîte de zinc et la tige de charbon ont une prise chacune. Afin de permettre la sortie du gaz se formant pendant le fonctionnement de la pile, on place dans sa partie supérieure un tube de verre *8*. Dans la partie supérieure de la pile on introduit du brai *9*.

La F.É.M. des piles sèches à dépolarisant de manganèse est de 1,4 à 1,6 V et leur résistance interne est de 0,1 à 0,5 ohm.

On appelle *capacité* de la pile la quantité d'électricité en ampères-heures qu'elle peut fournir dans des conditions de décharge déterminées.

Les essais des piles primaires montrent que leur capacité dépend :

1) de l'intensité du courant de décharge : plus ce courant est fort, plus la capacité de la pile est petite ;

2) du service de la pile (continu, intermittent) ;

3) de la température : la capacité de la pile est d'autant plus petite que la température est plus basse ;

4) de la valeur de la tension jusqu'à laquelle a lieu la décharge.

Les désignations des piles sèches à dépolarisant de manganèse sont les suivantes : C — pile sèche ; Л — d'été (fonctionnement entre —20° et +60 °C) ; X — résistant au froid (fonctionnement entre —40° et +40 °C) ; У — universelle (fonctionnement entre —40° et +60 °C).

Les premiers chiffres 1 — 4 indiquent les dimensions de la pile ; les lettres déterminent sa caractéristique ; les derniers chiffres indiquent sa capacité en ampères-heures.

Par exemple, 3c-Л-30 signifie : pile de troisième gabarit, sèche, pour service d'été, à capacité de 30 Ah.

En plus de ces piles, on produit aussi des piles sèches à dépolarisant manganèse-air (CMBД). Le dépolarisant de ces piles est un mélange de graphite, de charbon activé et de minerai de manganèse.

A la différence des éléments à dépolarisant de manganèse, dans les piles CMBД la partie supérieure du dépolarisant n'est pas entourée de toile et est couverte de carton. Dans les piles de ce modèle le dépolarisant communique directement avec l'air à travers des tubes de verre de sorte que la dépolarisation de ces piles se fait aussi bien par la manganèse que par l'oxygène contenu dans l'air. La capacité des piles CMBД est presque deux fois supérieure à celle des piles à dépolarisation par manganèse. Pendant le fonctionnement des piles CMBД, l'électrolyte se vaporise à travers les tubes de verre. Pour rétablir le fonctionnement normal de la pile on verse par les tubes de verre une solution de chlorure d'ammonium (environ 20 cm^3 par élément). On produit deux types de piles à dépolarisation par manganèse-air : 3CMBД (capacité initiale 45 Ah, courant de décharge nominal 50 mA) et 6CMBД (capacité initiale 150 Ah, courant de décharge nominal 150 mA).

Pour l'alimentation des circuits de chauffage des lampes radio, l'industrie soviétique produit des batteries sèches БНС-100 (capacité: 100 Ah, F.É.M. initiale: 1,5 V, courant de décharge maximal: 150 mA, nombre de piles: 12) et БНС-МВД-500 (quatre piles de type 6СМВД, F.É.M.: 1,4 V, capacité: 500 Ah).

Pour l'alimentation des anodes des lampes radio on utilise des batteries anodiques. Le plus souvent on trouve

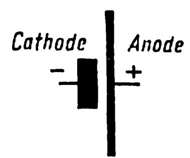


Fig. 58. Représentation conventionnelle des sources chimiques de tension

des batteries БАС (batterie sèche anodique). Les piles sèches sont également utilisées pour alimenter les circuits de signalisation, de transmission par téléphone, les lampes de poche (type КБС), etc.

La désignation des piles hydro-électriques et des autres sources d'énergie chimique sur les schémas est indiquée sur la figure 58.

§ 42. ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES

L'alimentation des circuits de commande, des appareils de protection (relais), de signalisation et d'éclairage de secours, des installations automatiques, des dispositifs de commande et des bobines de maintien des disjoncteurs rapides, des mécanismes auxiliaires des centrales et sous-stations électriques, doit être fournie par une source d'énergie électrique indépendante de l'état des principaux groupes de la centrale ou de la sous-station. Cette source d'énergie doit assurer un fonctionnement parfait et sans interruption des circuits cités aussi bien en marche normale de l'installation qu'en cas de panne.

Dans les centrales et sous-stations électriques, on utilise des batteries d'accumulateurs. Une batterie à grande capacité, chargée à temps, peut alimenter les récepteurs prévus pendant la durée de la panne.

Les accumulateurs sont également utilisés pour l'éclairage des automobiles et des voitures de chemin de fer, pour actionner les chariots électriques et les sous-marins, pour alimenter les postes radio et d'autres appareils, on les emploie souvent dans les laboratoires, etc.

Un accumulateur est une source secondaire de tension électrique. A la différence des piles hydro-électriques il peut fournir de l'énergie seulement après avoir été chargé préalablement. Les piles fournissent de l'énergie sans charge préalable et, pour cette raison, elles sont appelées piles primaires. Pour charger un accumulateur il faut le connecter à une source de tension continue. Par suite de l'électrolyse, l'état chimique des plaques de l'accumulateur change et une certaine différence de potentiel s'établit entre les plaques.

Une batterie d'accumulateurs comprend un certain nombre d'accumulateurs au plomb ou alcalins.

§ 43. ACCUMULATEURS AU PLOMB

Un accumulateur au plomb comprend plusieurs plaques positives et négatives placées dans un récipient rempli d'électrolyte. L'électrolyte utilisé est un mélange d'acide sulfurique et d'eau distillée. Le poids spécifique de la solution varie entre 1,08 et 1,21.

On distingue deux types de plaques d'accumulateur: à grande surface et à oxydes rapportés.

Les plaques à grande surface sont en plomb pur. Pour augmenter la surface des plaques on les fait nervurées.

Les plaques à oxydes rapportés sont des grilles de plomb dans les alvéoles desquelles on introduit les oxydes de plomb (litharge, minium). Pour prévenir la chute de la pâte des alvéoles les deux côtés de la plaque sont couverts des feuilles de plomb perforées. Généralement, les plaques positives de l'accumulateur sont du type à grande surface et les plaques négatives à oxydes rapportés.

Toutes les plaques positives sont soudées en un bloc isolé du bloc respectif des plaques négatives. Pour que le fonctionnement des plaques positives soit possible des deux côtés, il y en a toujours une de plus que de plaques négatives.

Les bacs des accumulateurs au plomb sont faits soit en verre ou en bois recouvert à l'intérieur de feuilles de plomb, soit en céramique, en ébonite ou en matière plastique.

Lors de leur fabrication les plaques sont soumises à un traitement électrochimique spécial (formation) de sorte que les plaques positives se couvrent de bioxyde de plomb PbO_2, tandis que les plaques négatives se couvrent de plomb spongieux pur Pb. La couleur des plaques permet de déterminer leur polarité: les plaques positives sont de couleur brun-rouge foncé, les plaques négatives sont grises.

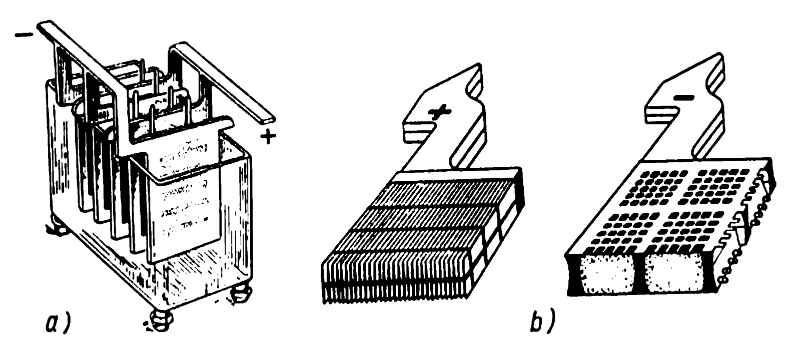


Fig. 59. Accumulateur au plomb:
a — vue extérieure; *b* — plaques de l'accumulateur

La figure 59 montre un accumulateur au plomb et ses plaques.

Les réactions chimiques ayant lieu lors de la décharge et la charge d'un accumulateur au plomb peuvent être représentées par une équation commune:

$$PbO_2 + 2H_2SO_4 + Pb \underset{\text{charge}}{\overset{\text{décharge}}{\rightleftarrows}} 2PbSO_4 + 2H_2O.$$

L'équation doit se lire de gauche à droite pour la décharge et de droite à gauche pour la charge de l'accumulateur.

Pour charger un accumulateur on le branche sur une source de tension continue (groupe moteur-générateur, redresseur) et en faisant varier la tension on maintient le courant de charge constant (fig. 60).

L'intensité du courant de charge ne doit pas dépasser la valeur maximale admise indiquée dans la fiche technique de l'accumulateur. Lorsque la tension de l'accumulateur atteint 2,3 à 2,4 volts par élément, des bulles de gaz commencent à se dégager. Ensuite on réduit l'intensité du courant

de charge de 50 à 60% et en continuant la charge on augmente progressivement la tension jusqu'à 2,5 ou 2,7 V.

La figure 61 montre les courbes de charge et de décharge d'un accumulateur au plomb. On y voit d'après la courbe qu'après le débranchement du groupe chargeur, la tension aux bornes de l'accumulateur descend rapidement de 2,7 à 2,1 V. Lors de la décharge, la tension de l'accumulateur après 1,9 V diminue lentement et jusqu'à 1,8 V rapidement. On ne doit pas décharger un accumulateur au-dessous de 1,75 ou 1,8 V, sous peine de détérioration, car l'oxyde de plomb (PbO) des plaques, en se combinant avec l'acide sulfurique (H_2SO_4), donne du sulfate de plomb aux gros grains difficilement solubles et de l'eau :

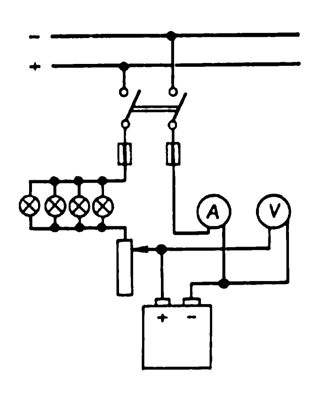


Fig. 60. Schéma de charge d'un accumulateur

$$PbO + H_2SO_4 = PbSO_4 + H_2O,$$

ce qui diminue considérablement la densité de l'électrolyte et rend difficile la marche des réactions chimiques. La transformation de la substance active des plaques en sulfate

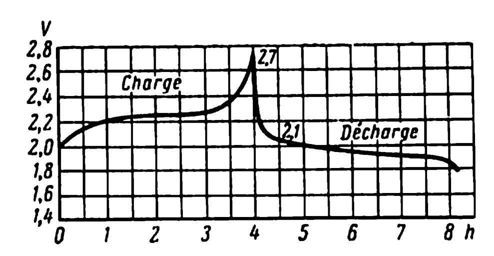


Fig. 61. Courbes de charge et de décharge d'un accumulateur au plomb

aux gros grains est appelée *sulfatation*. Lors du travail de l'accumulateur se produisent des pertes d'énergie dues à l'autodécharge. L'autodécharge est causée par les impuretés contenues dans l'électrolyte, ce qui provoque des réactions chimiques complémentaires et une perte d'éner-

gie. La résistance interne d'un accumulateur au plomb est petite. Elle est d'environ 0,001 ohm pour un accumulateur chargé et devient double environ à la fin de la décharge.

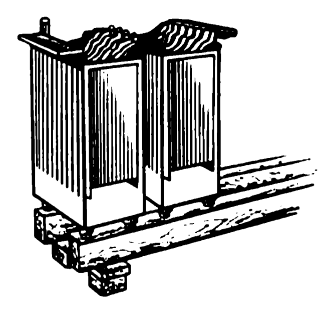


Fig. 62. Vue extérieure d'une batterie d'accumulateurs

Le rendement d'un accumulateur au plomb est de 75 à 84 %.

La figure 62 représente une batterie d'accumulateurs.

§ 44. ACCUMULATEURS ALCALINS

Afin d'économiser du plomb, on utilise dans les centrales et les sous-stations électriques des accumulateurs alcalins.

Les accumulateurs alcalins sont de deux types: au cadmium-nickel (type KH) et au fer-nickel (type ЖH).

La matière active des plaques positives des deux types d'accumulateurs alcalins est de l'hydrate de nickel. Pour les plaques négatives des accumulateurs au cadmium-nickel on utilise un mélange de cadmium et de fer et pour celles des accumulateurs au fer-nickel du fer chimiquement pur.

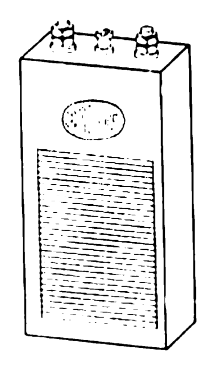
Les plaques des accumulateurs alcalins sont des cadres en acier nickelé avec alvéoles dans lesquelles on introduit de petits paquets d'acier perforé nickelé de 0,1 mm d'épaisseur. La matière active est mise à la presse dans ces paquets. Dans les accumulateurs au fer-nickel le nombre de plaques négatives n'est pas égal au nombre de plaques positives: il y en a une de plus et le bloc de plaques négatives est réuni à la masse du bac.

Dans les accumulateurs au cadmium-nickel, au contraire, il y a une plaque négative de moins et le bac est connecté au bloc de plaques positives.

Dans les accumulateurs alcalins on utilise comme bac une boîte en tôle d'acier à joints soudés dont le couvercle présente trois trous: deux pour les bornes de sortie et un pour l'introduction de l'électrolyte et la sortie des gaz.

L'électrolyte est une solution de potasse caustique KOH à densité de 1,18 à 1,20.

La figure 63 montre un accumulateur alcalin.


Fig. 63. Vue extérieure d'un accumulateur alcalin

Lors de la décharge d'un accumulateur au fer-nickel, les hydrates des oxydes supérieurs de la plaque positive se transforment en hydrates des oxydes inférieurs et le fer chimiquement pur de la plaque négative se transforme en hydrate d'oxyde de fer.

Lors de la charge les réactions chimiques ont lieu en sens inverse. L'équation de la réaction de décharge et de charge se présente comme suit:

$$2Ni(OH)_3 + 2KOH + Fe \underset{\text{charge}}{\overset{\text{décharge}}{\rightleftarrows}} 2Ni(OH)_2 + 2KOH + Fe(OH)_2.$$

L'équation de la réaction de décharge et de charge pour un accumulateur au cadmium-nickel se présente comme suit:

$$2Ni(OH)_3 + 2KOH + Cd \underset{\text{charge}}{\overset{\text{décharge}}{\rightleftarrows}} 2Ni(OH)_2 + 2KOH + Cd(OH)_2.$$

Au début de la charge d'un accumulateur alcalin, on applique aux bornes de chaque élément une tension d'environ 1,55 V, ensuite on l'augmente progressivement jusqu'à 1,75 ou 1,8 V à la fin de la charge.

La tension d'un accumulateur alcalin chargé débranché du dispositif de charge est comprise entre 1,25 et 1,3 V.

On peut décharger un accumulateur alcalin seulement jusqu'à la tension de 1,0 à 1,1 V. Si la température du milieu ambiant baisse par rapport à sa valeur normale (+25°), la capacité des accumulateurs alcalins diminue de 0,5 % pour chaque degré de baisse de la température.

Par rapport aux accumulateurs au plomb les accumulateurs alcalins présentent les avantages suivants.

1. Pour leur fabrication on n'a pas besoin de plomb qui est relativement cher.

2. Ils possèdent une grande endurance et une bonne résistance mécanique, c'est-à-dire qu'ils ne craignent pas de forts courants de décharge et même des courts-circuits et supportent bien des secousses et des chocs.

3. Lors d'un long repos, les pertes par autodécharge sont faibles, les accumulateurs ne se dégradent pas et leur durée de service est grande.

4. Ils dégagent moins de gaz nocifs et de vapeur lorsqu'ils fonctionnent.

5. Leur poids est inférieur à celui des accumulateurs au plomb.

6. Ils ne demandent pas un entretien permanent.

Par contre, leurs défauts par rapport aux accumulateurs au plomb sont les suivants.

1. Leur F.É.M. est plus faible.

2. Ils ont un rendement plus petit (52 à 55 %).

3. Leur prix est plus élevé.

§ 45. GROUPEMENT DE SOURCES DE F.É.M.

Les sources de tension (accumulateurs, piles) peuvent être branchées en série, en parallèle et de façon mixte.

1. Groupement de sources en série. Une connexion où le pôle négatif de chaque accumulateur est connecté au pôle positif de l'accumulateur suivant est appelée *connexion en série*. Un groupe d'accumulateurs connectés entre eux est appelé *batterie*. La connexion de trois accumulateurs en série est représentée sur la figure 64,*a* et le schéma de cette connexion est donné sur la figure 64,*b*. Etant donné que les F.É.M. des accumulateurs sont toutes dirigées dans le même sens, la F.É.M. de la batterie est égale à leur somme:

$$E = E_1 + E_2 + E_3.$$

La résistance interne de la batterie est égale à la somme des résistances internes des accumulateurs:

$$r_0 = r_{01} + r_{02} + r_{03}.$$

Si la batterie est fermée sur une résistance externe r, le courant dans le circuit peut être calculé d'après

la formule :

$$I=\frac{E}{r_0+r}=\frac{E_1+E_2+E_3}{r_{01}+r_{02}+r_{03}+r}.$$

On connecte les accumulateurs en série lorsque la tension du récepteur est supérieure à la F.É.M. que peut fournir un accumulateur isolé et le courant du récepteur ne dépasse pas le courant de décharge de l'accumulateur.

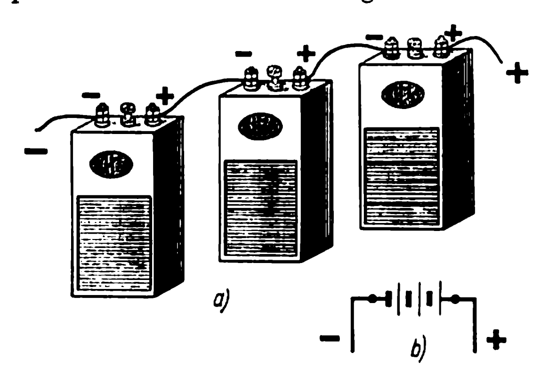


Fig. 64. Connexion des accumulateurs en série

Pratiquement, on ne connecte en batterie que des accumulateurs du même type, c'est-à-dire ayant les mêmes F.É.M., les mêmes résistances internes et les mêmes capacités.

Dans ce cas, la F.É.M. de la batterie comprenant n accumulateurs est égale à :

$$E_{bat}=E\cdot n.$$

La résistance interne de la batterie est :

$$r_0=r_{01}\cdot n.$$

Le courant de la batterie débitant dans une résistance externe r est :

$$I=\frac{E\cdot n}{r_{01}n+r}.$$

Exemple 3. Une batterie comprenant cinq accumulateurs à F.É.M. de 1,2 V et d'une résistance interne de 0,2 ohm chacun débite dans une résistance externe r de 11 ohms. Calculer le courant fourni par la batterie.

$$I=\frac{E\cdot n}{r_{01}n+r}=\frac{1,2\cdot 5}{0,2\cdot 5+11}=0,5\text{A}.$$

2. Groupement de sources en parallèle. Si les pôles positifs de plusieurs accumulateurs sont réunis à une borne commune et leurs pôles négatifs à une autre borne commune, une telle connexion est appelée *connexion en parallèle*. La figure 65,*a* montre la connexion en parallèle de trois accumulateurs et la figure 65,*b*, le schéma de cette connexion.

Pour la connexion en parallèle des accumulateurs il faut que leurs F.É.M., leurs résistances internes et leurs

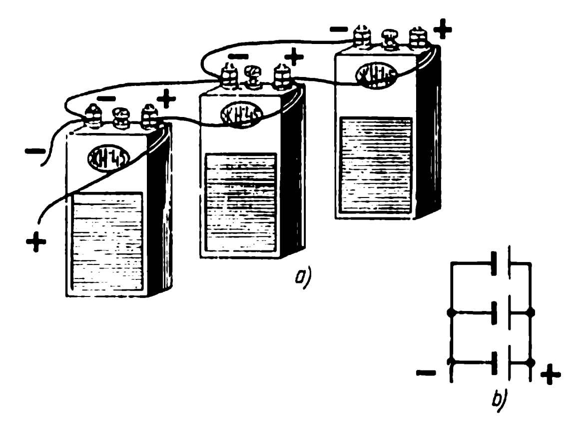


Fig. 65. Connexion des accumulateurs en parallèle

capacités respectives soient égales, car dans le cas contraire il y aura entre les accumulateurs une circulation de courants égalisateurs nuisibles à la batterie.

Dans le montage en parallèle, la F.É.M. de la batterie est égale à la F.É.M. d'un accumulateur:

$$E_{\text{bat}} = E_1 = E_2 = E_3 = \ldots E_n.$$

Mais étant donné que dans ce cas les sens des courants de tous les accumulateurs coïncident, la batterie fournira au réseau un courant supérieur à celui que peut fournir un accumulateur pris à part.

La résistance interne d'une batterie comprenant n accumulateurs branchés en parallèle sera n fois inférieure à la résistance d'un accumulateur individuel:

$$r_0 = \frac{r_{01}}{n}.$$

Le courant fourni par la batterie au réseau sera donc :

$$I = \frac{E}{\frac{r_{01}}{n} + r}.$$

Le montage des accumulateurs en parallèle est utilisé lorsque la tension du récepteur est égale à la F.É.M. d'un accumulateur et le courant nécessaire pour alimenter le récepteur est supérieur au courant de décharge d'un accumulateur individuel.

Exemple 4. Calculer le courant fourni au réseau par une batterie comprenant deux accumulateurs branchés en parallèle, lorsque la F.É.M. de chaque accumulateur est égale à 2 V et la résistance interne de chacun d'eux est de 0,02 ohm. La résistance externe est de 1,99 ohm.

$$I = \frac{E}{\frac{r_{01}}{n} + r} = \frac{2}{\frac{0,02}{2} + 1,99} = 1\text{A}.$$

3. Groupement mixte de sources. En combinant les connexions en série et en parallèle on obtient une connexion mixte des accumulateurs. La figure 66,*a* représente la connexion mixte de quatre accumulateurs comprenant deux groupes parallèles à deux éléments chacun et la figure 66,*b* donne le schéma de cette connexion. La F.É.M. d'une batterie d'accumulateurs connectés de façon mixte est égale à la somme des F.É.M. des éléments couplés en série dans chaque groupe (n).

$$E_{\text{bat}} = En.$$

La résistance interne des accumulateurs faisant partie du groupe :

$$r_{0g} = r_{01}n.$$

La résistance interne d'une batterie comprenant m groupes :

$$r_{0\,\text{bat}} = \frac{r_{0g}}{m} = \frac{r_{01}n}{m}.$$

Le courant fourni par la batterie au réseau dont la résistance est de r ohms :

$$I = \frac{E_{\text{bat}}}{r_{0\,\text{bat}} + r} = \frac{En}{\frac{r_{01}n}{m} + r}.$$

La connexion mixte des accumulateurs est utilisée lorsque la tension et le courant du récepteur sont supérieurs à la F.É.M. et au courant de décharge d'un accumulateur individuel.

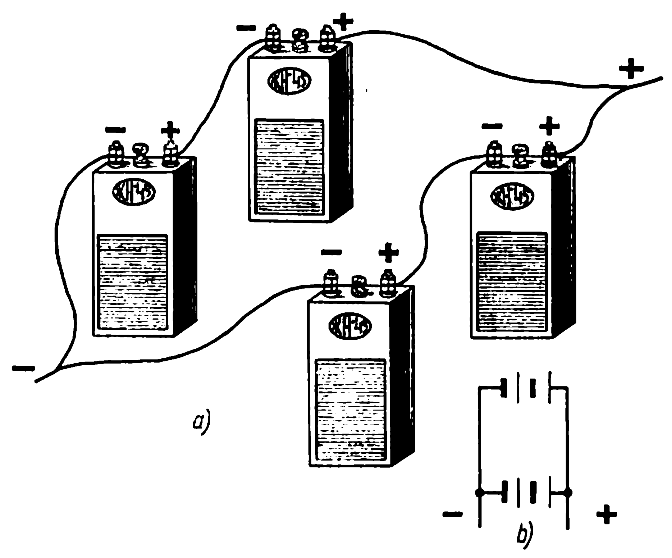


Fig. 66. Connexion mixte des accumulateurs

Exemple 5. On a une batterie comprenant deux groupes d'accumulateurs de trois éléments chacun. La batterie débite dans une résistance de 1,65 ohm ; la F.É.M. d'un accumulateur est de 1,2 V ; la résistance interne est de 0,1 ohm. Quelle est l'intensité du courant débité par la batterie ?

$$I = \frac{En}{\frac{r_{01}n}{m} + r} = \frac{1{,}2 \cdot 3}{\frac{0{,}1 \cdot 3}{2} + 1{,}65} = 2A.$$

Nous avons examiné plusieurs cas de connexion de sources de F.É.M. Voyons maintenant la méthode de connexion la plus économique permettant d'obtenir la puissance maximale dans le circuit externe. Le calcul donne une réponse à cette question. Il s'avère que pour obtenir dans le circuit externe la puissance utile maximale, il faut que la résistance interne soit égale à la résistance externe du circuit :

$$r_0 = r.$$

Problèmes

1. Combien de mg de zinc seront déposés lors du passage de 50 C d'électricité à travers une solution saline de zinc ?

2. Un bain contenant une solution de sulfate de cuivre est parcouru par un courant de 5 A pendant 20 minutes. Quelle est la quantité de cuivre déposée ?

3. Lors du nickelage des pièces on utilise comme anode une plaque de nickel de 20 g. Dans combien de temps cette plaque sera-t-elle consommée étant donné que la solution est parcourue par un courant de 10 A ?

4. Une plaque métallique, dont la surface est de 2 dm^2 doit être recouverte d'une couche de zinc de 0,05 mm d'épaisseur. Combien de temps faudra-t-il pour cette opération, si le courant est de 1 A et le poids spécifique du zinc est de 7,1 ?

5. Un objet métallique aux dimensions de $10 \times 40 \times 60$ mm doit être recouvert d'argent. Quelle est l'intensité de courant nécessaire pour recouvrir l'objet d'une couche d'argent de 0,01 mm d'épaisseur pendant 0,5 heure ? Le poids spécifique de l'argent est de 10,5.

6. On dispose d'une batterie de quatre accumulateurs à F.É.M. de 1,2 V et à résistance interne de 0,2 ohm chacun. La batterie débite dans une résistance de 4 ohms. Calculer le courant débité par la batterie lorsque les accumulateurs sont montés en série et lorsqu'ils sont montés en parallèle.

7. Quatre accumulateurs, dont la F.É.M. est de 1,2 V et la résistance interne est de 0,3 ohm, sont branchés en série. La résistance externe est de 8,4 ohms. Quelles sont les indications de l'ampèremètre et du voltmètre dans la partie extérieure du circuit ?

8. Trois groupes parallèles d'accumulateurs comprenant chacun cinq accumulateurs branchés en série débitent dans un réseau extérieur dont la résistance est de 4,995 ohms. La F.É.M. de chaque accumulateur est de 2 V et la résistance interne est de 0,003 ohm. Calculer le courant, la tension et la puissance de la batterie.

Questions de contrôle

1. Qu'est-ce que l'électrolyse ?
2. De quoi dépend la quantité de matière dégagée aux électrodes pendant l'électrolyse ?
3. Qu'entend-on par l'équivalent électrochimique de la matière ?
4. En quoi consistent la première et la deuxième lois de Faraday ?
5. Quelles sont les applications industrielles de l'électrolyse ?
6. Comment est constituée une pile hydro-électrique ?
7. Comment sont constitués les accumulateurs ? Comment fonctionnent-ils ?
8. Quels sont les modes de groupement des sources de tension ?

CHAPITRE IV

ACTIONS THERMIQUES DU COURANT

§ 46. ÉCHAUFFEMENT D'UN CONDUCTEUR PAR LE COURANT ÉLECTRIQUE

On sait que tous les corps se composent de molécules se déplaçant d'une manière chaotique. Plus la température d'un corps est élevée, plus le mouvement des molécules de ce corps est rapide. Mais il existe une température à laquelle le mouvement des molécules s'arrête. Elle est égale à —273 °C et est appelée zéro absolu. Dans les conditions naturelles cette température n'existe pas sur la terre. Ce n'est qu'au laboratoire qu'on peut obtenir une température voisine du zéro absolu.

Dans un conducteur parcouru par un courant électrique le mouvement des molécules existe également. Dans ce cas les électrons entrent en collision avec les molécules et accélèrent leur mouvement, ce qui provoque l'échauffement du conducteur.

La quantité de chaleur est mesurée en calories (cal). Une calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 °C la température de 1 g d'eau. Une kilocalorie (kcal) est égale à 1000 calories.

Exemple 1. Quelle est la quantité de chaleur nécessaire pour provoquer l'ébullition de 250 g d'eau à température initiale de 10° C ?

Nous allons raisonner ainsi : pour élever la température de 1 g d'eau de 1 °C il faut une calorie. Pour élever la température de 250 g d'eau de 1 °C il faut 250 calories. Pour réchauffer 250 g d'eau de 90 °C (100°—10°) il faut 250·90 = 22 500 calories = 22,5 kilocalories.

§ 47. LOI DE JOULE-LENZ

Les expériences ont permis de déterminer que la quantité de chaleur dégagée par le courant traversant un conducteur dépend de la résistance du conducteur, de l'intensité et de la durée de passage du courant.

Cette loi a été établie en 1841 par le physicien anglais Joule et, indépendamment de lui, en 1844, par l'académicien russe Lenz.

Les relations quantitatives ayant lieu lors de l'échauffement d'un conducteur par le courant sont appelées loi de Joule-Lenz.

Nous avons établi précédemment :

$$1\ \text{kW} = \frac{1}{0{,}736}\ \text{ch} = 1{,}36\ \text{ch},$$

d'où

$$1\ \frac{\text{kgfm}}{\text{s}} = \frac{1}{75}\ \text{ch} = \frac{736}{75}\ \text{W} = 9{,}81\ \text{W} = 9{,}81\frac{\text{J}}{\text{s}}\ ;$$

$$1\text{J} = \frac{1\ \text{kgfm}}{9{,}81} = 0{,}102\ \text{kgfm}.$$

Puisque 1 cal = 0,427 kgfm, on a :

$$1\text{J} = \frac{0{,}102}{0{,}427}\ \text{cal} = 0{,}24\ \text{cal}.$$

De cette façon : 1J = 0,24 cal.

L'énergie du courant électrique est déterminée par la formule :

$$A = I^2 rt\text{J}.$$

Puisque l'énergie du courant est dépensée pour l'échauffement, la quantité de chaleur dégagée par le courant dans le conducteur est :

$$Q = 0{,}24 I^2 rt\ \text{cal}.$$

Cette formule qui exprime la loi de Joule-Lenz montre que la quantité de chaleur en calories dégagée par le courant lors de son passage dans un conducteur est égale au coefficient 0,24 multiplié par le carré de l'intensité de courant en ampères, la résistance en ohms et le temps en secondes.

Exemple 2. Quelle est la quantité de chaleur dégagée pendant 3 minutes par un courant de 6 A traversant un conducteur de 2 ohms ?

$$Q = 0{,}24 \cdot I^2 \cdot r \cdot t = 0{,}24 \cdot 36 \cdot 2 \cdot 180 = 3110{,}4\ \text{cal}.$$

On peut écrire la formule de la loi de Joule-Lenz sous la forme suivante :

$$Q = 0{,}24 \cdot I \cdot I \cdot r \cdot t,$$

et puisque $I \cdot r = U$, on peut écrire :

$$Q = 0{,}24 \cdot I \cdot U \cdot t\ \text{cal}.$$

Exemple 3. Un réchaud électrique est branché sur le secteur de 120 V. Le courant passant par son élément chauffant est de 5 A. Quelle est la quantité de chaleur que le courant dégage pendant 2 heures ?

$$Q = 0{,}24 \cdot I \cdot U \cdot t = 0{,}24 \cdot 5 \cdot 120 \cdot 7200 = 1\,036\,800 \text{ cal} = 1036{,}8 \text{ kcal}.$$

§ 48. TEMPÉRATURE D'ÉCHAUFFEMENT D'UN CONDUCTEUR PAR LE COURANT ÉLECTRIQUE

Lorsqu'ils sont parcourus par le courant tous les conducteurs s'échauffent et cèdent leur chaleur au milieu ambiant (air, liquides, corps solides). La température du conducteur s'élèvera tant que la quantité de chaleur reçue par le conducteur ne sera pas égale à la quantité de chaleur qu'il cède au milieu ambiant. La température d'échauffement d'un conducteur dépend de l'intensité de courant qui le traverse, de la section et de la nature du conducteur, ainsi que des conditions de refroidissement. Pour un courant et un matériau conducteur donnés, la température d'échauffement du conducteur ne dépend pas de sa longueur, car plus il est long, plus grande est la surface de refroidissement.

Si l'on choisit un conducteur d'un matériau déterminé et si on le place dans des conditions de refroidissement déterminées, l'échauffement d'un tel conducteur est d'autant plus grand que la densité de courant dans ce dernier est plus élevée.

Afin d'économiser le matériau, on cherche à faire passer par le conducteur un courant maximal, mais pour chaque conducteur il existe une température qui ne doit pas être dépassée. Par exemple, les conducteurs dotés d'une isolation en caoutchouc et en tresse de coton ne doivent pas être chauffés à une température dépassant 50° C afin de ne pas endommager l'isolation. Pour cette raison, on choisit les conducteurs selon leur section pour une densité déterminée de courant. Par exemple, la densité maximale admissible pour des fils et câbles de cuivre isolés qui ne sont pas enterrés, en fonction de la section, est indiquée dans le tableau 10.

Ce tableau montre que la densité de courant diminue avec l'accroissement de la section du conducteur. Ceci s'explique par le fait que lorsqu'ils s'échauffent les conducteurs de faible section cèdent leur chaleur au milieu ambiant tandis que les couches internes d'un conducteur de grande

Tableau 10

Densité admissible du courant pour fils de cuivre isolés

Section, mm²	Courant, A	Densité de courant, A/mm²	Section, mm²	Courant, A	Densité de courant, A/mm²
0,75	13	17,4	50	192	3,8
1	15	15,0	70	242	3,5
1,5	20	13,3	95	292	3,1
2,5	27	10,8	120	342	2,8
4	36	9,0	150	392	2,6
6	46	7,7	185	450	2,4
10	68	6,8	240	532	2,2
16	92	5,7	300	614	2,0
25	123	4,9	400	737	1,8
35	152	4,3			

section transmettent leur chaleur aux couches voisines qui, elles aussi, sont déjà chaudes.

Les fils non isolés (nus) permettent, grâce à un meilleur refroidissement, des densités de courant plus grandes (tableau 11).

Tableau 11

Densité admissible du courant pour fils non isolés

Section, mm²	Dans un local		A l'air libre	
	Courant, A	Densité de courant, A/mm²	Courant, A	Densité de courant, A/mm²
4	57	14,2	58	14,5
6	73	12,2	76	12,6
10	103	10,3	108	10,8
16	130	8,1	150	9,4
25	165	6,6	205	8,2
35	210	6,0	270	7,7
50	265	5,3	335	6,7
70	340	4,8	425	6,1
95	410	4,3	510	5,4

Il est à noter que si un fil de cuivre isolé de 25 mm² de section admet un courant de 123 A, la section d'un fil d'aluminium pour la même intensité de courant doit être 1,5 fois plus grande, sinon le fil sera surchauffé par suite d'une résistivité plus grande de l'aluminium.

L'énergie du courant électrique dépensée pour l'échauffement des fils est perdue inutilement. Aussi, lors du calcul des fils cherche-t-on à réduire les pertes par échauffement de façon qu'elles ne dépassent pas 5 à 10 % de toute l'énergie.

Mais l'échauffement d'un conducteur n'est pas toujours nuisible. L'effet thermique du courant électrique est largement utilisé et souvent on cherche à obtenir de grandes quantités de chaleur dégagée par le courant. Nous décrivons ci-dessous quelques applications pratiques de l'effet thermique du courant.

§ 49. LAMPES À INCANDESCENCE

Le principe de fonctionnement d'une lampe à incandescence est basé sur un fort échauffement d'un conducteur (du filament de la lampe) lorsqu'il est parcouru par un courant. Le conducteur émet également de l'énergie lumineuse. Pour que le filament ne soit pas grillé, il faut le placer dans une ampoule où on a fait le vide. Ce sont les lampes à vide. Initialement, on utilisait un filament en charbon obtenu à partir des fibres végétales. Les lampes munies d'un tel filament émettaient une faible lumière jaunâtre et absorbaient une grande puissance. Le filament de charbon s'échauffait jusqu'à 1700 °C et s'usait graduellement, ce qui mettait rapidement la lampe hors d'usage. Actuellement les lampes à filament de charbon ne sont plus utilisées.

Les lampes actuelles ont un filament en osmium ou en tungstène (fig. 67), qui sont des métaux réfractaires. Un filament en tungstène dans les lampes à vide s'échauffe jusqu'à 2200 °C, émet une lumière plus brillante et absorbe une puissance inférieure à celle absorbée par un filament en charbon.

L'usure du filament diminue lorsqu'on remplit le ballon de la lampe d'un gaz ne maintenant pas la combustion, par exemple, d'azote ou d'argon. Ces lampes sont appelées lampes à gaz. La température du filament dans une lampe à gaz atteint 2800 °C.

L'industrie soviétique produit des lampes à incandescence pour des tensions de 36, 110, 127 et 220 V. On fabrique également des lampes spéciales pour d'autres tensions.

Le rendement des lampes à incandescence est très faible. Seulement 4 à 5 % de l'énergie électrique absorbée par

la lampe est transformée en énergie lumineuse ; le reste de l'énergie est transformé en chaleur.

A l'heure actuelle on utilise largement les lampes fluorescentes. On y utilise la propriété des gaz raréfiés d'émettre de la lumière lorsqu'ils sont parcourus par un courant électrique. La lumière émise par une telle lampe dépend de la nature du gaz. Le néon produit une lumière rouge-orange, l'argon donne une lumière bleue-violette et l'hélium fournit une lumière rose jaunâtre. L'alimentation

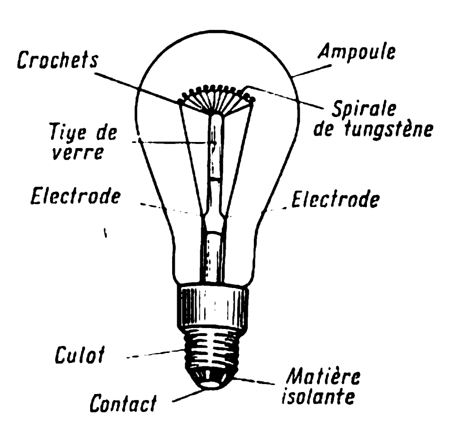


Fig. 67. Lampe à incandescence

de ces lampes est assurée par un courant alternatif de haute tension obtenu à l'aide de transformateurs. Ces lampes sont employées pour des enseignes, tableaux publicitaires, etc.

On produit également des lampes dont les tubes de verre sont remplis de vapeur de mercure raréfiée. Le passage du courant électrique à travers les lampes à vapeur de mercure provoque une faible lueur.

La surface interne du tube est recouverte d'une composition spéciale appelée luminophore, émettant de la lumière sous l'action de la lueur de la vapeur de mercure. Ces lampes sont appelées lampes fluorescentes.

A l'heure actuelle on fabrique 3 types de lampes fluorescentes: les lampes ДС (lumière du jour) utilisées pour l'éclairage des locaux, où il faut pouvoir distinguer les couleurs (industries polygraphique, textile, etc.) ; les lampes БС (lumière blanche) pour l'éclairage des locaux indus-

triels, des bureaux et des appartements et les lampes TБ (lumière blanche chaude) pour l'éclairage des musées, des théâtres, des pinacothèques. Le rendement des lampes

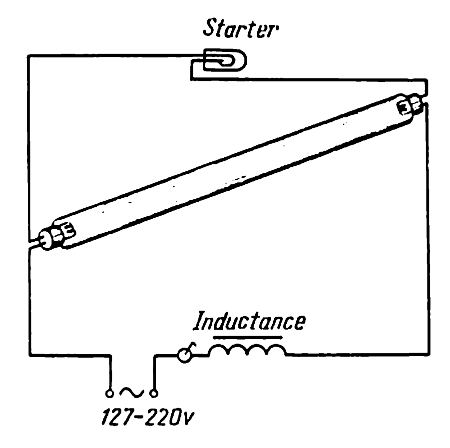


Fig. 68. Schéma de branchement d'une lampe fluorescente

fluorescentes est quatre fois supérieur à celui des lampes à incandescence ordinaires.

La figure 68 représente le schéma de branchement d'une lampe fluorescente.

§ 50. ARC ÉLECTRIQUE

Si l'on rapproche les bouts de deux conducteurs connectés aux pôles d'une génératrice de façon qu'ils se touchent presque, une étincelle apparaît entre ces bouts. Par suite



Fig. 69. Arc électrique

du mauvais contact les bouts des conducteurs s'échauffent et lorsqu'on les écarte l'étincelle se transforme en arc (fig. 69) et produit une forte lumière aveuglante.

Les conducteurs servant à obtenir un arc sont faits en charbon réfractaire résistant à la haute température

développée par l'arc et qui atteint 3500 °C. La majorité des substances réfractaires ne résistent pas à sa flamme et fondent.

Lorsqu'on alimente un arc électrique en courant continu, l'électrode de charbon positive s'use plus rapidement que l'électrode négative faite également en charbon. Il se forme alors au milieu de l'électrode positive un cratère. Pour cette raison, lorsque l'arc est alimenté en courant continu l'électrode positive utilisée a un diamètre deux fois plus grand que celui de l'électrode négative. Pour un arc alimenté en courant alternatif on utilise des électrodes de charbon de même diamètre. En plaçant à l'intérieur des électrodes des tiges en sels de certains métaux, on peut obtenir différentes teintes de la lumière émise par l'arc.

Lors du fonctionnement de l'arc, les bouts des charbons brûlent et la distance entre eux augmente. Or, pour que l'arc ne s'éteigne pas il faut les rapprocher constamment. On utilise à cette fin des régulateurs manuels (dans les lampes de projection) ou des régulateurs automatiques (dans les projecteurs).

Les premiers régulateurs automatiques pour arc électrique ainsi que les régulateurs qui répondent aux variations du courant ou de la tension ont été construits par l'électricien russe V. Tchikolev (1845-1898).

Pour qu'un arc fonctionne de façon stable il faut employer une tension comprise entre 40 et 60 V et un courant non inférieur à 10 ou 12 A. Si la génératrice qui alimente l'arc électrique fournit une tension supérieure à celle qui est requise, on peut réduire la tension en excédent à l'aide d'une résistance additionnelle branchée en série avec le dispositif comportant l'arc.

Exemple 4. Calculer la résistance additionnelle pour une lampe à arc d'un appareil de projection de cinéma qui nécessite une tension de 50 V et un courant de 12 A. La tension de la génératrice est de 110 V (fig. 70).

La chute de tension dans la résistance additionnelle est:

$$110-50=60 \text{ V}.$$

La chute de tension de 60 V dans la résistance additionnelle parcourue par un courant de 12 A peut être obtenue lorsque la résistance:

$$r=\frac{U}{I}=\frac{60}{12}=5 \text{ ohms}.$$

Le savant russe P. Yablotchkov (1847-1894) a été le premier à utiliser l'arc électrique pour l'éclairage; il est l'inventeur de la « bougie électrique ».

La « bougie » de Yablotchkov était formée par deux électrodes de charbon placées l'une à côté de l'autre et séparées par une garniture en argile cuite (kaolin). Au fur et à mesure que les électrodes brûlaient, la garniture fondait de sorte que la distance entre elles restait constante.

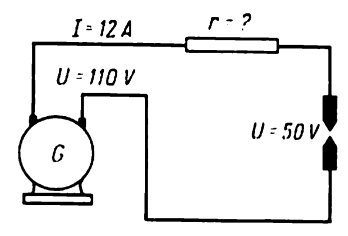


Fig. 70. Schéma pour l'exemple 4

Grâce au fort éclat et à la grande intensité lumineuse que produit l'arc électrique, il est utilisé dans les projecteurs pour éclairer des objets éloignés parfois de plusieurs kilomètres.

La chaleur dégagée par l'arc électrique est utilisée dans les fours à arc. Dans ces fours on arrive à faire fondre la plupart des matériaux réfractaires.

§ 51. SOUDAGE ÉLECTRIQUE

Il existe deux modes de soudage: 1) le soudage à l'arc et 2) le soudage par résistance.

Soudage à l'arc. Il a été inventé par l'ingénieur russe N. Benardos, en 1882.

Lors du soudage à l'arc on utilise la chaleur dégagée par l'arc. On connecte un pôle de la source de tension à une tige de charbon et l'autre pôle aux pièces qu'il faut souder (fig. 71). On introduit dans la flamme de l'arc une tige métallique assez fine qui fond, et les gouttes du métal fondu en coulant sur les pièces et en se figeant forment le cordon de soudure.

La méthode de soudage proposée par l'ingénieur russe Slavianov consiste en ceci. La tige de charbon est remplacée par une électrode métallique (fig. 72). C'est l'électrode

qui fond et le métal fondu, en se figeant, réunit les pièces à souder. L'électrode usée est remplacée par une électrode neuve.

Avant de souder une pièce il faut la nettoyer soigneusement en enlevant la rouille, les battitures, l'huile et la crasse à l'aide d'un burin, d'une lime ou de la toile émeri.

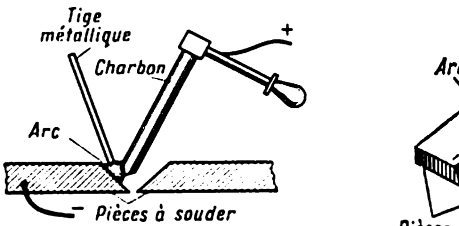


Fig. 71. Soudage électrique par la méthode de Benardos (à électrode de charbon)

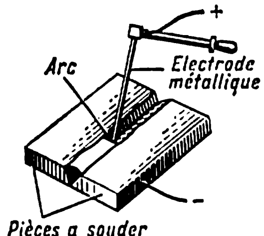


Fig. 72. Soudage électrique par la méthode de Slavianov (à électrode métallique)

Pour créer un arc stable et obtenir un cordon de soudure résistant, on couvre les électrodes métalliques avec des compositions spéciales. Lors de la fusion de l'électrode l'enrobage fond également et, en couvrant les surfaces fortement chauffées des pièces à souder, empêche leur oxydation.

Soudage électrique par résistance. Si l'on met en contact deux pièces métalliques et l'on fait passer un courant électrique intense par ces pièces, il se produit un fort dégagement de chaleur à l'endroit de contact (par suite de la grande résistance de contact) si bien que les pièces s'échauffent jusqu'à une température élevée et se soudent.

A l'heure actuelle, le soudage à l'arc ainsi que le soudage par résistance sont largement utilisés dans l'industrie. Ces méthodes permettent de souder des tôles et des cornières d'acier, des poutres et des rails, des mâts et des tubes, des fermes et des chaudières, des éléments des navires, etc. Par soudage on fait de nouvelles pièces et on répare des pièces usées en acier, fonte et métaux non ferreux.

Les ingénieurs soviétiques ont mis au point grand nombre de nouvelles méthodes d'utilisation du soudage électrique. Le professeur K. Khrénov a proposé une méthode de soudage subaquatique largement utilisée lors de la construction du pipe-line Saratov-Moscou. Le soudage

automatique conçu par l'académicien E. Paton permet d'effectuer un soudage rapide et de haute qualité dans la fabrication en série. L'académicien V. Nikitine a mis au point un appareil de soudage à courant alternatif. Cet appareil comporte un élément spécial, un générateur, destiné à fournir un courant de haute tension et de très haute fréquence, permettant d'obtenir un arc stable lors du soudage des pièces métalliques de faible et de grande épaisseur.

Lorsqu'on ferme et ouvre un circuit électrique à l'aide d'un interrupteur ou l'on ferme et ouvre les contacts des appareils électriques, il se produit entre les contacts une étincelle, qui est souvent suivie d'un arc électrique faisant fondre les contacts métalliques et mettant hors service toute l'installation. Ce phénomène est appelé érosion électrique. L'étincelle, pour ainsi dire, « ronge » le métal. Pour éviter l'apparition de l'étincelle parfois on branche parallèlement aux contacts un condensateur de capacité convenable.

Cette propriété «rongeante» de l'étincelle électrique a été utilisée dans un appareil spécial construit par les ingénieurs B. Lazarenko et I. Lazarenko. Le principe de fonctionnement de cet appareil est le suivant. Un des contacts de la génératrice est connecté à une tige métallique, l'autre est réuni à la pièce à usiner immergée dans l'huile. On fait vibrer la tige métallique. L'étincelle apparaissant entre la tige et la pièce «ronge» cette dernière et produit un trou de section identique à celle de la tige (à six pans, carré, triangulaire, etc.).

§ 52. APPAREILS DE CHAUFFAGE ÉLECTRIQUES

Les appareils de chauffage électriques d'usage ménager (réchauds, fers à repasser, grils, etc.) et d'usage industriel (fours à moufle et à creuset, fours de séchage, etc.) sont très répandus.

L'élément principal de chaque appareil chauffant est un conducteur dans lequel se dégage la chaleur lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. Le plus souvent le conducteur est enroulé en spirale que l'on place sur une embase résistante à la chaleur ou réfractaire (par exemple, en céramique, amiante, mica, etc.). Pour la fabrication des spirales chauffées à l'air on utilise généralement le

nichrome (fig. 73). Le fil utilisé pour thermo-plongeurs est fabriqué souvent en rhéotan ou en nickéline. Si l'on

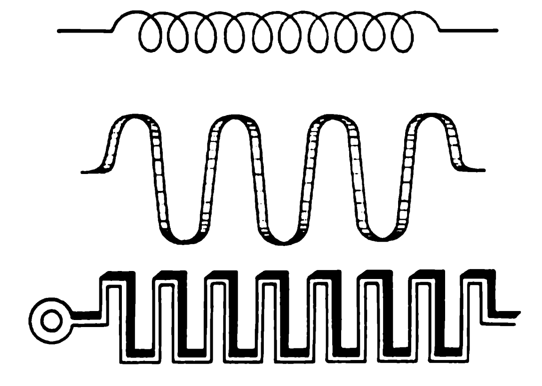


Fig. 73. Eléments chauffants

fait passer le courant par un tel élément chauffant se trouvant hors de l'eau il grille immédiatement la conductibilité thermique de l'air étant de beaucoup inférieure à celle de l'eau et par conséquent la chaleur dégagée ne peut pas être évacuée assez rapidement.

§ 53. RELAIS THERMIQUES

L'élément principal d'un relais thermique est formé par une lame bimétallique.

Si l'on prend deux lames de même métal et on les chauffe, elles s'allongeront de façon identique (fig. 74, *a*). Mais

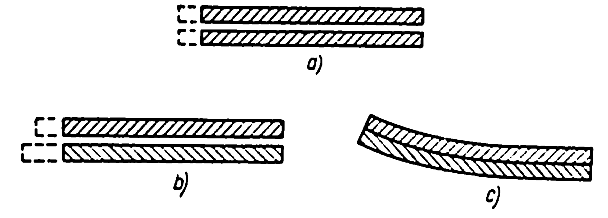


Fig. 74. Dilatation des lames métalliques lors de l'échauffement

si l'on chauffe deux lames de métaux différents, elles s'allongeront de façon inégale étant donné que leurs coefficients de dilatation sont différents (fig. 74, *b*). Deux lames de métaux différents, rivées ou soudées, forment une lame bimé-

tallique. Généralement, une lame bimétallique, appelée parfois bilame, est en invar (alliage de fer et nickel) et en laiton. Lorsque la lame est chauffée, elle s'incurve du côté du métal à coefficient de dilatation inférieur (fig. 74, *c*).

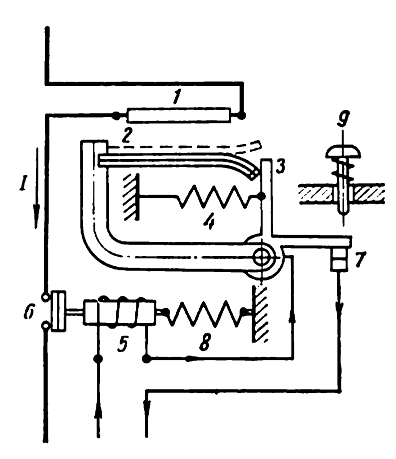


Fig. 75. Schéma d'un relais thermique

La figure 75 schématise la structure d'un relais thermique. Examinons son fonctionnement.

La mise en marche d'un moteur électrique se fait à l'aide du bouton « marche ». Lorsqu'on appuie sur ce bouton, la bobine magnétique *5* connecte les contacts *6* dans le circuit principal du moteur et ce dernier se met en marche.

La spirale chauffante *1* du relais thermique est chauffée par le courant du moteur. La lame bimétallique *2* située près de la spirale est également chauffée, mais le relais thermique est réglé de façon qu'en régime normal la quantité de chaleur dégagée par la spirale ne puisse pas incurver la lame bimétallique.

En cas de surcharge, le moteur commence à absorber un courant supérieur à la valeur nominale, son enroulement est surchauffé et peut griller. Le relais thermique entre alors en jeu. En cas de surcharge prolongée et dangereuse du moteur, la quantité de chaleur dégagée par la spirale *1* augmente. La lame bimétallique *2* étant fortement chauffée s'incurve et libère le levier *3* bloqué précédemment par la lame. Le levier tiré par le ressort *4* pivote alors, en ouvrant les contacts *7* et en coupant ainsi le circuit de la bobine magnétique *5* qui, sous l'action du ressort *8*, ouvre les contacts principaux *6* dans le circuit du moteur. Il s'ensuit l'arrêt du moteur. C'est ainsi que le relais thermique protège le moteur contre les surcharges.

Pour remettre le moteur en marche, il convient tout d'abord de fermer les contacts *7* en tournant à la main le levier *3* à l'aide d'un bouton-poussoir spécial *9* « retour ». Mais le levier *3* retourne à sa place seulement lorsque la

lame bimétallique *2* se refroidit et revient en position initiale (0,5 à 3 mn après le débranchement) en bloquant de nouveau le levier. Et ce n'est qu'après cela que la pression sur le bouton « marche » provoque la mise en circuit du moteur. On peut aussi arrêter le moteur à tout moment en appuyant sur le bouton « arrêt » (les boutons ne figurent pas sur le schéma).

§ 54. COUPE-CIRCUIT À FUSIBLES

Un coupe-circuit à fusible se compose d'un fil (ou d'une lame de cuivre), de plomb ou d'argent inséré dans le circuit. Selon leurs constructions les coupe-circuit se divisent en :

1) coupe-circuit à vis (fig. 76, *a*),
2) coupe-circuit à lamelles (fig. 76, *b*),
3) coupe-circuit tubulaire (fig. 76, *c*).

Dans les coupe-circuit à vis le fil fusible *1* est placé à l'intérieur d'un bouchon en porcelaine *2* qui est vissé ou

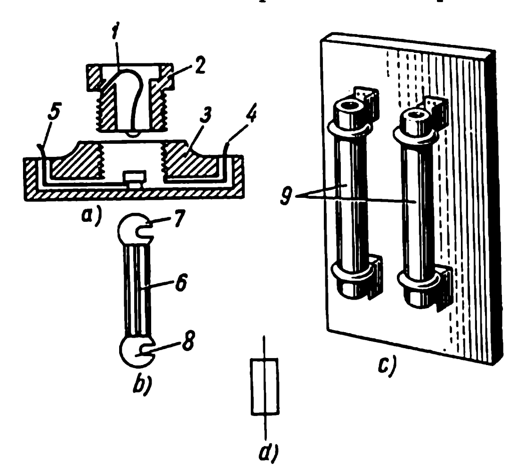


Fig. 76. Coupe-circuit à fusibles

fixé dans l'embase *3* à laquelle aboutissent les fils *4* et *5* du circuit à couper. Dans les coupe-circuit à lamelles l'élément fusible *6* porte à ses extrémités des cosses *7* et *8* serrées par des vis fixées sur une embase isolante. Les fils du circuit à couper aboutissent aux vis. Dans les coupe-circuit tubulaires l'élément fusible est placé à l'intérieur d'un tube en porcelaine *9* facilement amovible.

Les coupe-circuit sont choisis et montés de façon que lorsque le courant dans le circuit dépasse une limite admissible, le fil ou la lamelle du coupe-circuit saute et interrompt le circuit. Un coupe-circuit correctement calculé doit sauter avant que les fils du réseau commencent à s'échauffer de façon excessive. La désignation conventionnelle des coupe-circuit utilisés dans les schémas éléctriques est indiquée sur la fig. 76, *d*.

Dans le tableau 12 on trouve les données concernant le choix du courant nominal d'un coupe-circuit pour des fils avec isolation en caoutchouc placés dans un même tube, ainsi que pour des câbles à deux ou trois conducteurs isolés au caoutchouc.

Tableau 12

Courant nominal des coupe-circuit à fusibles

Section du fil, mm²	Courant nominal du coupe-circuit, A	Section du fil, mm²	Courant nominal du coupe-circuit, A
1	10	25	100
1,5	10	35	125
2,5	20	50	160
4	25	70	200
6	35	95	225
10	60	120	260
16	80	150	300

§ 55. JONCTION DES CONDUCTEURS

Lorsque les conducteurs sont mal raccordés l'endroit de jonction présente une forte résistance de contact et, de ce fait, s'échauffe anormalement et peut même brûler. Pour prévenir ce phénomène, on nettoie soigneusement les bouts des fils à joindre, on les étame, on les tord et puis on soude l'endroit de raccord. Lorsqu'on doit connecter les bouts des barres de cuivre, d'aluminium ou de fer, on les nettoie préalablement en enlevant la rouille et l'oxyde à l'aide d'une lime et de papier de verre. Ensuite, on place les barres, l'une sur l'autre, et on les serre à l'aide de boulons.

Pour prévenir l'oxydation, on enduit l'endroit de raccord avec de la vaseline technique pure.

Les longues barres rectilignes (dépassant 15 m pour l'aluminium et 25 m pour le cuivre) sont dotées de compensateurs. Pour les compensateurs on utilise le même

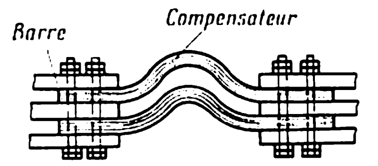


Fig. 77. Compensateur

matériau que pour les barres, mais en lamelles séparées de 0,4 à 1 mm d'épaisseur (fig. 77). Les compensateurs préviennent l'incurvation des barres lorsque celles-ci se dilatent sous l'effet de la chaleur.

§ 56. THERMO-ÉLECTRICITÉ. THERMOCOUPLES

Examinons le phénomène appelé *thermo-électricité.* Si l'on soude les bouts de deux métaux de nature différente et on réunit les deux autres bouts aux bornes d'un galvanomètre, en chauffant l'endroit de soudure des métaux on peut remarquer que l'aiguille du galvanomètre indique le passage d'un courant dans le circuit. Un couple de métaux utilisé à cette fin est appelé *couple thermo-électrique ou thermocouple.* Le courant circulant dans le circuit est appelé courant *thermo-électrique* et la F.É.M. produisant ce courant est appelée *force thermo-électromotrice.*

La force thermo-électromotrice est petite. Elle est approximativement proportionnelle à la différence entre la température de la soudure chaude et celle du milieu ambiant. Dans le tableau 13 sont indiquées les forces thermo-électromotrices fournies par certains couples de métaux, la différence de température entre la soudure et le milieu ambiant étant de 100 °C.

Le signe « + » signifie que le courant se dirige par la soudure chaude du premier métal vers le second. Les thermocouples sont largement utilisés pour la mesure de la température. Un thermomètre utilisant un couple thermo-électrique est organisé de façon suivante. On introduit deux fils métalliques (par exemple, en platine et en platine rhodié) dans un tube en porcelaine. La soudure est placée

Tableau 13

Force thermo-électromotrice des thermocouples

Métaux soudés	F. É. M., V
Antimoine-bismuth	—0,011
Cuivre-fer	+0,001
Cuivre-constantan	—0,0047
Argent-constantan	—0,0041
Argent-nickel	—0,0024
Platine-platine rhodié (alliage comprenant 90 % de platine et 10 % de rhodium)	—0,001

dans la zone à haute température. Les bouts libres des fils sont connectés aux bornes d'un galvanomètre dont l'échelle est graduée en degrés centigrades. Les couples thermo-électriques permettent de mesurer des températures élevées (dépassant 2000 °C) ainsi que des basses températures. La précision des couples thermo-électriques est supérieure à celle des thermomètres d'autres types.

Problèmes

1. Quelle est la quantité de chaleur dégagée pendant une heure par un courant de 5 A passant par l'élément chauffant d'un fer à repasser dont la résistance est de 24 ohms ?

2. La force électromotrice d'un accumulateur est égale à 2 V et la résistance interne à 0,5 ohm. Les bornes de l'accumulateur sont réunies par un conducteur de 3,5 ohms. Calculer la quantité de chaleur dégagée par le courant dans le conducteur pendant 0,5 heure.

3. Deux lampes électriques dont les résistances sont respectivement de 250 et de 100 ohms sont branchées sur le secteur de 100 V. Calculer la quantité de chaleur dégagée pendant 3 minutes par le courant passant dans chaque lampe lorsqu'elles sont connectées: a) en série, b) en parallèle.

4. L'élément chauffant d'un réchaud électrique est enroulé en fil de nichrome dont la section est de 0,5 mm² et la longueur de 10 m. Quelle quantité de chaleur sera dégagée par le courant pendant 10 minutes si le réchaud est branché sur le secteur de 110 V ?

5. Trois conducteurs dont les résistances sont respectivement de 2, 3 et 6 ohms sont branchés en parallèle. Le courant total est de 18 A. Calculer la quantité de chaleur dégagée par le courant en une seconde dans chaque conducteur.

6. La force électromotrice d'une génératrice est de 20 V et la résistance interne de 0,2 ohm. Dans le circuit extérieur est branché un thermoplongeur électrique en fil de nickéline de 0,2 mm² de section

et de 10 m de longueur. Calculer la quantité de chaleur dégagée par le courant dans le thermoplongeur en 1 heure.

7. Calculer un réchaud électrique qui pourrait faire bouillir en 40 minutes 2,5 litres d'eau à température initiale de 10 °C. Les pertes de chaleur pour réchauffement du réchaud, de la casserole et de l'air atteignent 40 %. Le réchaud comporte un élément chauffant en fil de nichrome de 0,5 mm² de section. Quelle doit être la longueur du fil de nichrome si le réchaud est branché sur le secteur de 120 V ?

Questions de contrôle

1 Comment s'énonce la loi de Joule-Lenz et quelle est sa formule ?

2 Que signifie le nombre 0,24 dans la formule de la loi de Joule-Lenz ?

3. Quelles sont les applications pratiques de l'effet thermique du courant électrique ?

4. Quelle est la destination des coupe-circuit à fusibles ? Comment sont-ils organisés ?

5. Quelle est l'organisation des relais thermiques ? Dans quels domaines sont-ils utilisés.?

6. Comment se fait le soudage électrique ?

7. Qu'est-ce que la densité de courant et pourquoi la densité de courant diminue pour les conducteurs de grande section ?

8. De quoi dépend l'échauffement d'un conducteur ?

9. Qu'est-ce que la thermo-électricité et quelles sont ses applications ?

CHAPITRE V

ÉLECTROMAGNÉTISME

§ 57. CHAMP MAGNÉTIQUE AUTOUR D'UN CONDUCTEUR RECTILIGNE PARCOURU PAR UN COURANT

Dans le premier chapitre nous avons étudié un des éléments du champ électromagnétique, le champ électrique. Nous allons examiner maintenant son second élément, le champ magnétique.

Si l'on approche une aiguille aimantée d'un conducteur rectiligne dans lequel circule un courant électrique, elle tend à se mettre perpendiculairement au plan passant par l'axe du conducteur et par le centre de rotation de l'aiguille. Cela prouve qu'elle est soumise à l'action de certaines forces que l'on nomme forces magnétiques. Le champ magnétique agit aussi sur les particules chargées en mouvement et sur les conducteurs parcourus par un courant qui se trouvent dans le champ magnétique. Dans les conducteurs se déplaçant dans un champ magnétique ou dans les conducteurs immobiles qui se trouvent dans un champ magnétique variable apparaît une F.É.M. d'induction.

Conformément à tout ce que nous venons de dire le champ magnétique peut être défini ainsi.

On appelle champ magnétique l'un des deux éléments du champ électromagnétique qui est provoqué par les charges électriques des particules en mouvement et par la variation du champ électrique. Il se caractérise par l'action sur les particules chargées en mouvement et, par conséquent, sur les courants électriques.

Prenons un morceau de carton saupoudré de limailles de fer et faisons-le traverser par un gros conducteur. Si maintenant l'on fait passer un courant par ce conducteur on peut remarquer que les grains de limaille se disposent autour du conducteur suivant des circonférences concentriques, qui représentent dans ce cas les lignes d'induction du champ magnétique (fig. 78). Aussi la disposition des

grains de limaille ne change pas quand on déplace le morceau de carton vers le haut ou vers le bas le long du conducteur. Le champ magnétique apparaît donc autour du conducteur suivant toute sa longueur.

Si l'on place sur le morceau de carton des petites aiguilles aimantées, on peut constater qu'elles tournent lorsqu'on change le sens du courant dans le conducteur (fig. 79). Cela prouve que le sens des lignes d'induction change avec le sens du courant dans le conducteur.

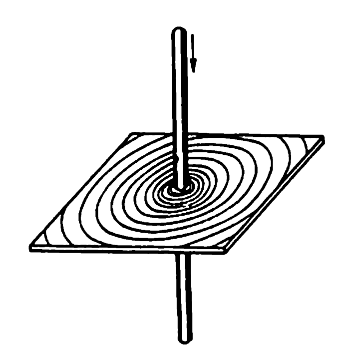


Fig. 78. Champ magnétique autour d'un conducteur parcouru par un courant

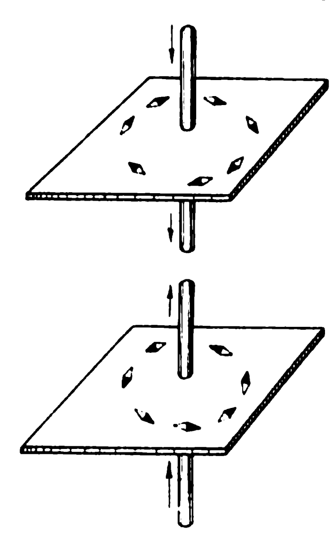


Fig. 79. Sens des lignes d'induction

Les lignes d'induction autour d'un conducteur parcouru par un courant possèdent les propriétés suivantes:

1) les lignes d'induction d'un conducteur rectiligne ont la forme de circonférences concentriques;

2) les lignes d'induction sont d'autant plus denses qu'elles se trouvent plus près du conducteur;

3) l'induction magnétique (l'intensité de champ) dépend de l'intensité du courant circulant dans le conducteur;

4) le sens des lignes d'induction dépend du sens du courant dans le conducteur.

Pour indiquer le sens du courant dans un conducteur représenté en coupe on utilise une désignation conventionnelle généralement adoptée. Si on place mentalement dans le conducteur une flèche dans le sens du courant (fig. 80),

nous verrons l'empennage de la flèche (une croix), lorsque le courant s'éloigne de nous (en traversant la figure d'avant en arrière) et la pointe de la flèche (un point), lorsque le courant est dirigé vers nous.

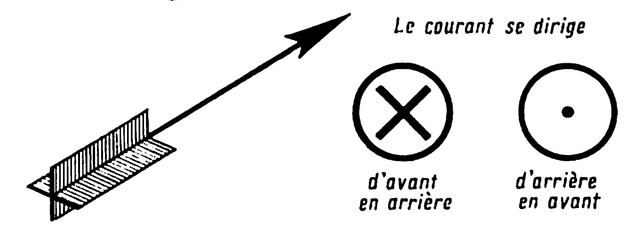


Fig. 80. Désignation conventionnelle du sens du courant dans les conducteurs

Le sens des lignes d'induction autour d'un conducteur parcouru par un courant est donné par la « règle du tire-bouchon » (connue aussi sous le nom de règle de la vis normale). Si le tire-bouchon fileté à droite avance dans le sens du courant, le sens de rotation de sa poignée coïncidera avec le sens

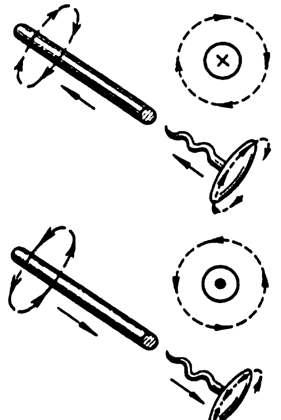


Fig. 81. Détermination du sens des lignes d'induction autour d'un conducteur parcouru par un courant d'après la « règle du tire-bouchon »

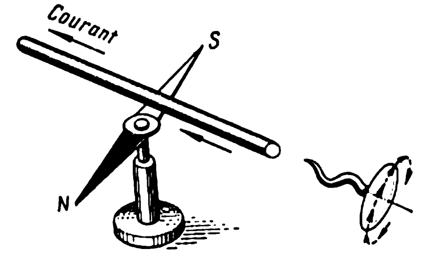


Fig. 82. Détermination du sens de la déviation de l'aiguille magnétique approchée d'un conducteur parcouru par un courant d'après la « règle du tire-bouchon »

des lignes d'induction disposées autour du conducteur (fig. 81).

Une aiguille aimantée placée dans le champ d'un conducteur parcouru par un courant se place le long des lignes

d'induction. Aussi pour déterminer comment elle se dispose peut-on également se servir de la règle du tire-bouchon (fig. 82). Le champ magnétique est l'une des manifestations principales du courant électrique et ne peut être obtenu indépendamment ou séparément du courant. *Le champ magnétique est caractérisé par le vecteur d'induction magnétique ayant une grandeur et une direction déterminées dans l'espace.*

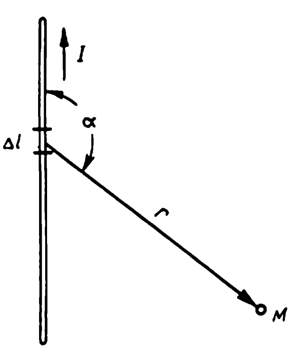


Fig. 83. Schéma illustrant la loi de Biot et Savart

L'expression quantitative de l'induction magnétique a été obtenue expérimentalement par les physiciens français Biot et Savart (fig. 83). En mesurant, d'après la déviation d'une aiguille aimantée, les champs magnétiques des courants électriques de valeurs et de formes différentes, les deux savants sont arrivés à la conclusion que tout élément de courant crée à une certaine distance de lui un champ magnétique. *L'induction magnétique ΔB d'un tel champ est proportionnelle à la longueur Δl de cet élément, à l'intensité du courant I, au sinus de l'angle α formé par la direction du courant et le rayon vecteur reliant le point du champ qui nous intéresse à l'élément donné du courant et inversement proportionnelle au carré de la longueur de ce rayon vecteur r*:

$$\Delta B = K \frac{I \Delta l \sin \alpha}{r^2},$$

où K est un coefficient dépendant des propriétés magnétiques du milieu et du système d'unités choisi.

Dans le système MKSA, on a :

$$K = \frac{\mu\mu_0}{4\pi},$$

où μ_0 est la *perméabilité magnétique* du vide dans le système MKSA :

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\text{henry}}{\text{mètre}},$$

où le henry (H) est l'unité d'inductance (1H = 1 ohm·s),

μ est la *perméabilité magnétique relative*. C'est un coefficient sans dimension qui indique combien de fois la perméabilité magnétique du matériau donné est plus grande que celle du vide.

On peut définir la formule aux dimensions de l'induction magnétique d'après l'équation suivante:

$$[\Delta B] = \left[\frac{\mu\mu_0 I \Delta l \sin\alpha}{4\pi r^2}\right] = \frac{\text{ohm}\cdot\text{s}}{\text{m}}\cdot\frac{\text{A}\cdot\text{m}}{m^2} = \frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{m}^2};$$

Un volt-seconde est appelé *weber* (Wb)

$$[B] = \frac{\text{Wb}}{m^2}.$$

En pratique on rencontre une unité d'induction magnétique plus petite appelée *gauss* (Gs):

$$1\ \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = 10^4\ \text{Gs}.$$

La loi de Biot et Savart permet de calculer l'induction magnétique d'un conducteur rectiligne infiniment long:

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi a},$$

où a est la distance du conducteur au point où on détermine l'induction.

Le rapport de l'induction magnétique au produit des perméabilités magnétiques $\mu\mu_0$ est appelé *intensité du champ magnétique* et est désigné par la lettre H:

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0}$$

ou

$$B = H\mu\mu_0.$$

Cette dernière équation relie deux grandeurs magnétiques: l'induction et l'intensité du champ magnétique.

Définissons la formule aux dimensions de H:

$$[H] = \left[\frac{B}{\mu\mu_0}\right] = \frac{\text{V}\cdot\text{s}\cdot\text{m}}{\text{m}^2\cdot\text{ohm}\cdot\text{s}} = \frac{\text{A}}{\text{m}}.$$

Parfois on utilise une autre unité d'intensité du champ appelée *œrsted* (Œ):

$$1\text{Œ} = 79{,}6\ \text{A/m} \approx 80\ \text{A/m} \approx 0{,}8\ \text{A/cm}.$$

L'intensité du champ magnétique H, tout comme l'induction magnétique B, est une grandeur vectorielle.

Une ligne dont la tangente à chaque point coïncide avec la direction du vecteur du champ magnétique est appelée *ligne d'induction magnétique.*

Le produit de l'induction magnétique par l'aire perpendiculaire à la direction du champ (au vecteur de l'induction magnétique) est appelé *flux de vecteur d'induction magnétique* ou tout simplement *flux magnétique* et est désigné par la lettre Φ:

$$\Phi = BS.$$

La formule aux dimensions du flux magnétique est:

$$[\Phi] = [BS] = \frac{\mathrm{V \cdot s}}{\mathrm{m^2}}\,\mathrm{m^2} = \mathrm{V \cdot s} \text{ ou weber (Wb)},$$

c'est-à-dire que le flux magnétique est mesuré en volts-secondes ou en webers.

Le *maxwell* (Mx) est une unité plus petite du flux magnétique:

$$1\,\mathrm{Wb} = 10^8\,\mathrm{Mx}.$$

$$1\,\mathrm{Mx} = 1\,\mathrm{Gs} \cdot 1\,\mathrm{cm^2}.$$

§ 58. CONDUCTEUR CIRCULAIRE PARCOURU PAR UN COURANT

Faisons passer un courant par un conducteur circulaire. (fig. 84). On voit sur la figure que les lignes d'induction se ferment toujours autour du conducteur parcouru par le courant et ont la forme de circonférences. Les lignes d'induction entrent dans le plan du conducteur circulaire d'un côté et sortent de l'autre. Le champ magnétique d'un courant circulaire ressemble à celui d'un aimant très court dont l'axe coïncide avec la droite perpendiculaire au centre du plan du conducteur.

On peut déterminer le sens du champ du courant circulaire à l'aide de la « règle du tire-bouchon ».

Il faut placer le tire-bouchon suivant l'axe du conducteur circulaire, c'est-à-dire perpendiculairement à son plan. Si on tourne la poignée du tire-bouchon suivant le

sens du courant dans le conducteur, le mouvement d'avance du tire-bouchon indiquera le sens du champ magnétique.

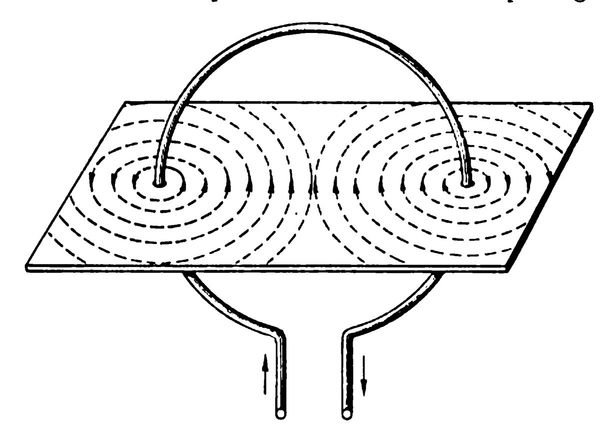


Fig. 84. Conducteur circulaire parcouru par un courant

L'intensité du champ magnétique au centre d'un conducteur circulaire parcouru par un courant est déterminée par la formule:

$$H = \frac{I}{2R};$$

et, en passant à l'induction magnétique, on a:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R} \quad \text{ou} \quad B = \frac{\mu\mu_0 I}{D},$$

où R est le rayon de la spire et D son diamètre.

§ 59. SOLÉNOÏDE. ÉLECTRO-AIMANT

On appelle *solénoïde* un conducteur enroulé en spirale et parcouru par un courant électrique (fig. 85,*a*).

Si on coupe mentalement les spires du solénoïde en travers, en désignant le sens du courant dans ces spires comme indiqué plus haut, et si on détermine le sens des lignes d'induction magnétique d'après la « règle du tire-bouchon », le champ magnétique du solénoïde entier aura l'aspect représenté par la figure 85,*b*.

Sur l'axe d'un solénoïde infiniment long dont chaque unité de longueur comporte n_0 spires, l'intensité du champ est déterminée par formule:

$$H = I \cdot n_0.$$

L'endroit où les lignes d'induction entrent dans le solénoïde est appelé pôle sud et celui où ces lignes en sortent est appelé pôle nord du solénoïde.

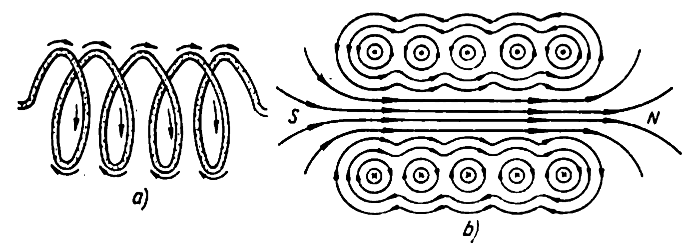


Fig. 85. Un solénoïde (*a*) et son champ magnétique (*b*)

Pour déterminer les pôles d'un solénoïde on se sert de la « règle du tire-bouchon » en l'utilisant de la façon suivante : si le tire-bouchon placé suivant l'axe du solénoïde tourne dans le sens du courant traversant les spires, le mouvement d'avance du tire-bouchon indique le sens du champ magnétique (fig. 86).



Fig. 86. Détermination des pôles d'un solénoïde

Un solénoïde à l'intérieur duquel se trouve un noyau d'acier (de fer doux) est appelé *électro-aimant* (fig. 87). Le champ magnétique d'un électro-aimant est plus fort que celui d'un solénoïde, car le noyau d'acier introduit dans ce dernier est aimanté et le champ magnétique résultant augmente. De même que pour un solénoïde les pôles d'un électro-aimant peuvent être déterminés par la « règle du tire-bouchon ».

Les électro-aimants sont largement utilisés dans l'électrotechnique. Ils servent à créer un champ magnétique dans les génératrices et les moteurs électriques, dans les appareils de mesure, ainsi que dans d'autres appareils.

Dans les installations de grande puissance pour couper une portion de circuit endommagée on utilise des disjoncteurs dans l'huile ou dans l'air et non pas des coupe-circuit à fusibles. Pour faire actionner les bobines de déclenchement des disjoncteurs on emploie différents types de relais.

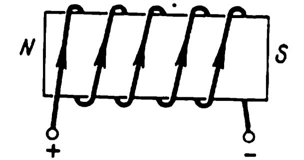


Fig. 87. Electro-aimant

On appelle relais un appareil répondant respectivement aux variations du courant, de la tension, de la puissance, de la fréquence, etc.

Il existe un grand nombre de types de relais qui diffèrent les uns des autres par leurs destination, principe de fonctionnement et construction. Nous allons brièvement examiner l'organisation des relais électromagnétiques dont les différents modèles sont représentés sur la figure 88.

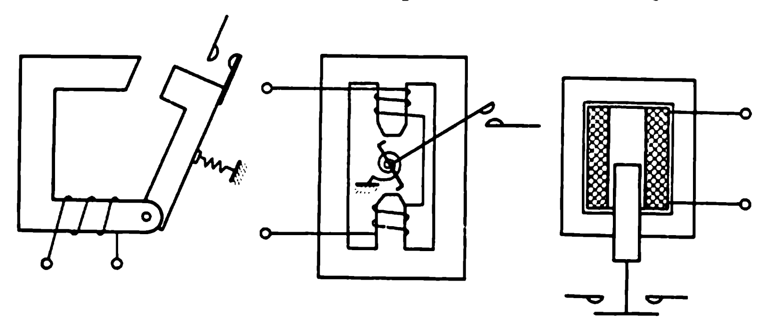


Fig. 88. Relais électromagnétique

Le fonctionnement d'un relais repose sur l'action qu'un champ magnétique créé par une bobine immobile parcourue par un courant exerce sur une armature mobile en acier. Lors de la variation des conditions de travail dans le circuit du courant principal la bobine du relais est excitée et le flux magnétique du noyau attire (fait pivoter ou plonger) l'armature qui ferme les contacts dans le circuit de la

bobine de déclenchement du dispositif de commande du disjoncteur ou d'un relais auxiliaire.

Les relais trouvent leur emploi aussi dans l'automatique et la télémécanique.

Le flux magnétique d'un solénoïde (d'un électro-aimant) augmente avec l'accroissement du nombre de spires et de l'intensité du courant qui les parcourt. La force magnétisante dépend du produit du courant par le nombre de spires (nombre d'ampères-tours).

Si, par exemple, on prend un solénoïde dont l'enroulement est parcouru par un courant de 5 ampères et ayant 150 spires, on aura pour la force magnétisante: $5 \cdot 150 = 750$ ampères-tours. On obtiendra le même flux magnétique en prenant un solénoïde de 1500 spires parcouru par un courant de 0,5 A : $0{,}5 \cdot 1500 = 750$ ampères-tours.

On peut augmenter le flux magnétique d'un solénoïde par les méthodes suivantes:

1) en introduisant un noyau de fer dans le solénoïde qui devient ainsi un électro-aimant;

2) en augmentant la section du noyau de fer de l'électro-aimant (car pour les valeurs données du courant, de l'intensité du champ magnétique et, par conséquent, de l'induction magnétique, l'accroissement de la section provoque une augmentation du flux magnétique);

3) en diminuant l'entrefer de l'électro-aimant (lorsqu'on diminue le parcours des lignes d'induction traversant l'air, la résistance magnétique appelée réluctance diminue également).

§ 60. LOI DE COURANT TOTAL

Imaginons qu'une ligne fermée arbitraire l traverse un conducteur parcouru par un courant, comme indiqué sur la figure 89, c'est-à-dire qu'ils soient liés comme deux maillons d'une chaîne. Construisons le vecteur d'intensité du champ H créée par le courant en un point arbitraire A situé sur la ligne l. Si cette ligne embrasse plusieurs conducteurs parcourus par des courants, il faut construire les vecteurs d'intensité du champ au point donné de la ligne pour chaque courant. En prenant la somme géométrique de tous les vecteurs d'intensité du champ, on trouve le vecteur d'intensité résultante du champ magnétique.

Dans le cas général, le vecteur d'intensité résultante du champ H forme avec l'élément de longueur Δl un angle α. Pour cette raison, la composante longitudinale ou tangentielle H_t de l'intensité résultante H sera :

$$H_t = H \cos \alpha.$$

Si l'on divise la ligne fermée en n éléments de longueur et on prend la somme des produits des longueurs de tous les

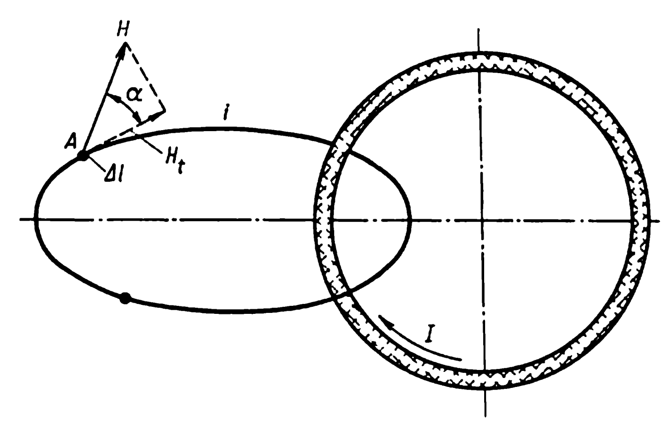


Fig. 89. Loi de courant total

éléments par les composantes tangentielles de l'intensité résultante du champ dans chaque élément, on obtient l'expression suivante :

$$H_1 \Delta l_1 \cos \alpha_1 + H_2 \Delta l_2 \cos \alpha_2 + \ldots + H_n \Delta l_n \cos \alpha_n.$$

On peut présenter cette somme :

$$\sum_{k=1}^{k=n} H_k \Delta l_k \cos \alpha_k,$$

où le signe $\sum\limits_{k=1}^{k=n}$ désigne la somme de $k = 1$ à $k = n$.

En électrotechnique théorique on démontre que la somme indiquée est égale à la somme algébrique des courants qui sont traversés par le contour de sommation, tout comme s'enlassent les maillons d'une chaîne. On peut donc écrire :

$$\sum H_k \Delta l_k \cos \alpha_k = \sum I.$$

Cette expression est appelée *loi de courant total.* Lorsque le contour fermé de sommation traverse le même courant à plusieurs reprises, par exemple, quand on a un enroulement ayant w spires, le courant total est :

$$\sum I = wI.$$

Si le contour fermé de sommation coïncide avec la ligne d'induction, le vecteur d'intensité du champ en un point quelconque du contour est dirigé suivant la tangente à l'élément de longueur Δl.

Dans ce cas :

$$H_{lk} = H_k; \ \alpha_k = 0; \qquad \cos \alpha_k = 1,$$

et la loi de courant total prend la forme suivante :

$$\sum_{k=1}^{k=n} H_k \Delta l_k = \sum I.$$

Si l'intensité du champ est la même pour tous les points du contour et la somme des éléments Δl suivant le contour est égale à l, la loi de courant total s'écrit comme suit :

$$Hl = \sum I.$$

La loi de courant total est la loi fondamentale utilisée lors du calcul des circuits magnétiques et dans certains cas ellė permet de déterminer facilement l'intensité du champ.

Par exemple, en utilisant la loi de courant total pour déterminer l'intensité du champ à une distance a d'un conducteur rectiligne parcouru par un courant, on a :

$$\sum I = I; \qquad l = 2\pi a.$$

Pour cette raison :

$$H 2\pi a = I,$$

d'où

$$H = \frac{I}{2\pi a} \frac{\text{A}}{\text{m}}.$$

La même formule avait été obtenue à partir de la loi de Biot et Savart.

Pour déterminer l'intensité du champ à l'intérieur d'une bobine enroulée sur un tore (fig. 90) nous allons nous servir de nouveau de la loi de courant total. Dans ce cas

le contour est un cercle de rayon r. Il traverse w spires parcourues par un courant de même sens:

$$H \cdot 2\pi r = Iw.$$

En désignant par $l = 2\pi r$ la longueur de la ligne médiane du tore, on obtient:

$$Hl = Iw,$$

d'où

$$H = \frac{Iw}{l} \frac{\text{A}}{\text{m}}.$$

L'intensité du champ H de la bobine est ainsi proportionnelle au produit du courant par le nombre de spires ou, autrement dit, au nombre d'ampères-tours. On appelle $I \cdot w$ *force magnétisante* et on la désigne par la lettre F.

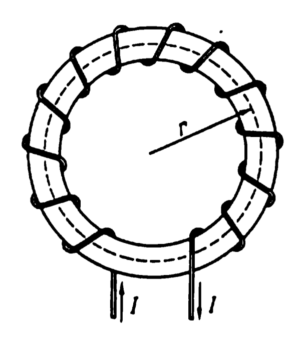


Fig. 90. Détermination de l'intensité du champ d'une bobine enroulée sur un tore

Etant donné que w est un nombre abstrait, la force magnétisante est mesurée en ampères.

L'induction magnétique à l'intérieur de la bobine est:

$$B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 \frac{Iw}{l} \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}.$$

Si la section du tore est la même sur toute sa longueur et est égale à S, on peut en connaissant l'induction magnétique B, déterminer le flux magnétique Φ:

$$\Phi = BS = \mu\mu_0 HS = \mu\mu_0 \frac{IwS}{l} \text{ Wb}.$$

Cette formule peut être écrite aussi sous une autre forme :

$$\Phi = \frac{wI}{\frac{l}{\mu\mu_0 S}}.$$

Par sa structure, cette formule ressemble à la formule d'Ohm. Nous avons dejà indiqué que le produit $I \cdot w$ est appelé force magnétisante. L'expression $\left(\frac{l}{\mu\mu_0 S}\right)$ se trouvant au dénominateur est appelée *réluctance* et est désignée par la lettre R_m :

$$R_m = \frac{l}{\mu\mu_0 S}.$$

Cette formule montre que la réluctance est proportionnelle au chemin parcouru par le flux magnétique et inversement proportionnelle à la section du matériau par lequel il passe.

Ainsi, le flux magnétique Φ est proportionnel à la force magnétisante F et inversement proportionnel à la réluctance R_m :

$$\Phi = \frac{F}{R_m}.$$

§ 61. CORPS FERROMAGNÉTIQUES, PARAMAGNÉTIQUES ET DIAMAGNÉTIQUES

D'après leurs propriétés magnétiques, on peut diviser tous les corps en trois groupes :

1. Les corps ferromagnétiques qui sont fortement attirés par un aimant. Font partie de ce groupe: le fer, l'acier, la fonte, le nickel, le cobalt, le gadolinium (un élément appartenant à la famille des terres rares) et certains alliages.

La perméabilité magnétique relative de ces corps est comprise entre plusieurs centaines et plusieurs dizaines de milliers. Par exemple, pour le cobalt elle est de 150, pour le nickel — de 300, pour le fer — de 5000, pour le permalloy (alliage d'acier et de nickel) elle atteint 100 000.

2. Les substances paramagnétiques qui sont faiblement attirées par un aimant. A ce groupe appartiennent l'aluminium, le magnésium, l'étain, le platine, le manganèse, l'oxygène, etc. La perméabilité magnétique relative de ces substances est un peu supérieure à l'unité. Par exemple, pour l'air $\mu = 1{,}0000031$.

3. Les substances diamagnétiques qui sont faiblement repoussées par un aimant. Ce sont le zinc, le mercure, le plomb, le soufre, le cuivre, le chlore, l'argent, l'eau, etc. La perméabilité magnétique relative de ces corps est un peu inférieure à l'unité. Par exemple, pour le cuivre $\mu = 0{,}999995$.

§ 62. CORPS FERROMAGNÉTIQUES DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE

La relation entre B et H pour les corps ferromagnétiques est généralement exprimée graphiquement sous forme d'une courbe appelée courbe d'aimantation. Pour construire

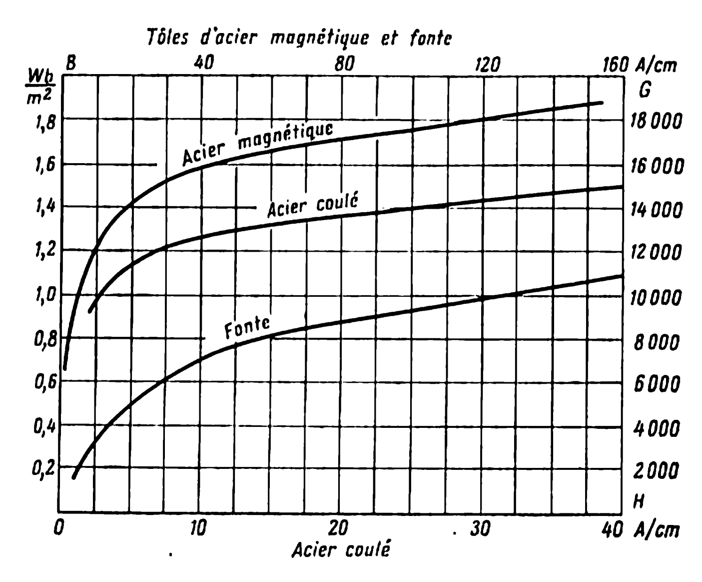


Fig. 91. Courbes d'aimantation de l'acier magnétique, de l'acier coulé et de la fonte

cette courbe, on porte sur l'abscisse l'intensité du champ magnétique H exprimée en $\frac{A}{m}$, $\frac{A}{cm}$ ou en œrsteds et, sur l'ordonnée, la valeur de l'induction magnétique B exprimée en $\frac{Wb}{m^2}$, $\frac{Wb}{cm^2}$ ou en gauss. La figure 91 donne les courbes d'aimantation de l'acier magnétique, de l'acier coulé et de

la fonte. Les valeurs de l'intensité du champ magnétique pour l'acier coulé sont indiquées sur l'horizontale inférieure et pour l'acier magnétique et la fonte sur l'horizontale supérieure. En examinant la courbe d'aimantation on voit qu'avec l'accroissement de l'intensité du champ H, l'induction magnétique B croît d'abord rapidement et ensuite à l'endroit où la courbe fait un coude la vitesse de l'accroissement de B diminue et, enfin, après le coude la courbe monte peu et devient une droite. Le dernier tronçon de la courbe caractérise l'état de saturation magnétique du matériau. La courbe d'aimantation montre que la relation $\frac{B}{\mu_0 H} = \mu$ n'est pas une grandeur constante et varie en fonction de B et de H.

La perméabilité magnétique des corps ferromagnétiques dépend de la valeur de l'induction magnétique, de la composition chimique du métal, de son traitement thermique et de son usinage, ainsi que de la température du métal. De plus, la perméabilité magnétique de ces corps dépend de leurs formes et dimensions géométriques.

Les courbes d'aimantation sont obtenues expérimentalement pour chaque matériau et pour chaque nuance de ce matériau.

Réduisons le courant dans les spires de la bobine. L'intensité du champ et, avec elle, l'induction magnétique diminuent également. Lorsque le courant dans l'enroulement de la bobine est nul, l'intensité du champ est aussi nulle. Cependant, le noyau d'acier conserve une certaine induction magnétique.

L'induction conservée par un corps ferromagnétique lorsque l'intensité du champ est nulle est appelée induction rémanente ou magnétisme rémanent.

Le fer pur, l'acier doux, les alliages de fer et de silicium (acier magnétique), les alliages de fer et de nickel (permalloy) possèdent un faible magnétisme rémanent. Ces métaux et alliages sont facilement aimantés et facilement désaimantés. Ils sont employés pour la fabrication des noyaux des électro-aimants, des transformateurs, des pièces polaires, des induits de génératrices, etc.

Certaines sortes d'acier dur (au tungstène, au chrome, au cobalt, au nickel-aluminium) possèdent un magnétisme rémanent élevé. Ces aciers sont utilisés pour la réalisation des aimants permanents.

§ 63. HYSTÉRÉSIS

Examinons le phénomène d'aimantation alternative d'un corps ferromagnétique. A cet effet, nous introduisons un noyau d'acier dans un enroulement et faisons circuler un courant continu dans cet enroulement. Supposons qu'au début le noyau de l'électro-aimant n'était pas aimanté. En faisant croître à partir de zéro le courant I passant par les spires de l'enroulement, nous augmentons la force magnétisante et l'intensité du champ H. L'induction magnétique B dans le noyau augmente également. La courbe

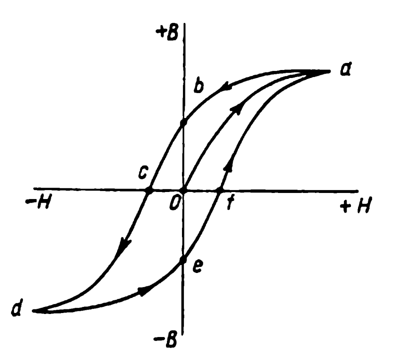


Fig. 92. Boucle d'hystérésis

d'aimantation Oa de la figure 92 augmente d'abord rapidement, puis, par suite de la saturation, elle croît lentement en tendant à devenir horizontale (point a). Si maintenant on diminue H, B décroît également. Mais, il se fait que la décroissance de B, c'est-à-dire la désaimantation du corps examiné, a lieu avec un certain retard par rapport à la diminution de H. La valeur de l'induction rémanente pour $H = 0$ est donnée par l'abscisse Ob.

Pour que l'induction magnétique dans le noyau redevienne nulle, il faut aimanter le matériau en sens inverse. A cet effet, on inverse le sens du courant dans l'enroulement. Les sens des lignes d'induction et de l'intensité du champ changent également. Pour l'intensité du champ $H = Oc$ l'induction dans le noyau est nulle et le noyau est entièrement désaimanté. La valeur de l'intensité du champ $H = Oc$ pour $B = 0$ est une caractéristique déterminée du matériau et est appelée force coercitive.

En répétant le cycle d'aimantation et de désaimantation on obtient une courbe fermée *a b c d e f a* appelée boucle d'hystérésis. Cette expérience permet de se convaincre facilement que l'aimantation et la désaimantation du noyau (apparition et disparition des pôles, de l'induction ou du flux magnétique) sont en retard sur l'instant d'apparition et de disparition des forces magnétisante et démagnétisante (du courant dans l'enroulement de l'électro-aimant). Le phénomène d'hystérésis peut être ainsi déterminé comme un retard des variations de l'induction magnétique sur les variations de l'intensité du champ. Le cycle d'hystérésis nécessite la dépense d'une certaine quantité d'énergie se dégageant dans le matériau sous forme de chaleur.

Le phénomène d'hystérésis est particulièrement fort lorsque le matériau du noyau possède un magnétisme rémanent considérable (par exemple, l'acier dur). Dans la plupart des cas l'hystérésis est un phénomène nuisible. Il produit un échauffement du noyau, donc une perte inutile de la puissance et un ronflement du noyau dû aux changements de la polarité et aux rotations des particules élémentaires du corps. Les premiers pas dans l'étude du phénomène d'aimantation de l'acier ont été réalisés en 1872 par le savant russe A. Stolétov (1839-1896) dans son ouvrage: « Sur la fonction d'aimantation du fer doux ».

§ 64. CIRCUITS MAGNÉTIQUES ET LEUR CALCUL

On appelle circuit magnétique l'itinéraire suivant lequel se ferme un flux magnétique. Cet itinéraire peut passer entièrement par l'air.

Sur la figure 93,*a* on voit un solénoïde, dont le circuit magnétique passe par l'air. La réluctance de l'air est très grande et, pour cette raison, même pour une grande force magnétisante le flux magnétique est petit.

Pour augmenter le flux on introduit dans le circuit magnétique des matériaux ferromagnétiques (généralement de l'acier coulé ou de l'acier magnétique) ayant une réluctance plus faible.

La figure 93,*b* représente un électro-aimant droit à noyau ouvert. On voit qu'une petite partie du parcours des lignes d'induction passe par le noyau d'acier, la plus grande partie de ce parcours passant par l'air. Les pôles de l'électro-aimant, comme nous l'avons vu, peuvent être déterminés à l'aide de la « règle du tire-bouchon ».

L'électro-aimant en fer à cheval (fig. 93,*c*) est un circuit magnétique qui offre les meilleures conditions au passage du flux magnétique. En effet, dans un tel électro-aimant la plus grande partie du parcours du flux magnétique suit l'acier et ne passe par l'air que du pôle *N* au pôle *S*.

La figure 93,*d* représente un circuit magnétique utilisé dans les machines et les appareils électriques. Entre les

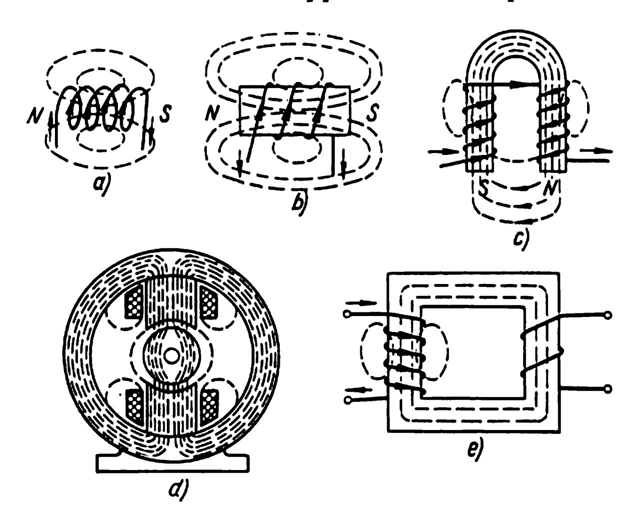


Fig. 93. Différents circuits magnétiques

pôles de l'électro-aimant se trouve un induit en acier. La plus grande partie du parcours des lignes d'induction suit l'acier et seulement une très faible partie (comprise entre quelques fractions de millimètre et 3 millimètres) passe par deux entrefers.

Les transformateurs comportent un noyau d'acier fermé (fig. 93,*e*). Les noyaux des transformateurs sont assemblés en plusieurs parties, mais lors de l'assemblage on prend des mesures pour que les entrefers séparant les différentes parties soient pratiquement nuls.

Jusqu'à présent nous n'avons rien dit à propos du flux magnétique se fermant autrement que par le noyau d'acier. Divers flux de dispersion sont indiqués sur les fig. 93,*b*, *c*, *d*, *e*.

Le flux magnétique total créé par l'enroulement d'excitation de l'électro-aimant est donc égal à la somme du flux utile et du flux de dispersion (flux de fuites).

Il pourrait sembler que les circuits magnétiques peuvent être calculés d'après la formule

$$\Phi = \frac{Iw}{\dfrac{l_m}{\mu\mu_0 S}} .$$

Pourtant, si l'on se souvient que la perméabilité magnétique relative μ n'est pas la même pour différents corps ferromagnétiques et qu'elle dépend de nombreuses causes, il devient clair qu'on ne peut se servir de cette formule que dans le cas où le circuit magnétique comprend uniquement des corps non magnétiques (y compris l'air) pour lesquels μ est une valeur donnée d'avance.

En pratique pour le calcul des circuits magnétiques on préfère utiliser des méthodes graphiques.

Le calcul d'un circuit magnétique se fait dans l'ordre suivant: on adopte une valeur nécessaire du flux magnétique, on divise le circuit magnétique en tronçons faits du même matériau et ayant la même section et on détermine pour chaque tronçon la valeur de l'induction magnétique d'après la formule:

$$B = \frac{\Phi}{S} .$$

Ensuite, d'après les courbes d'aimantation pour le matériau donné, on trouve pour chaque valeur de l'induction magnétique la valeur de H. Si le circuit magnétique comporte des entrefers, on détermine la relation entre B_0 et H_0 suivant la formule:

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0 10^7}{4\pi} = 80 \cdot 10^4 B_0 \frac{\text{A}}{\text{m}} ,$$

dans laquelle B_0 est exprimé en $\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$, μ_0 en $\frac{H}{\text{m}}$ et H_0 en $\frac{\text{A}}{\text{cm}}$.

Si l'induction est exprimée en gauss et l'intensité du champ en $\frac{\text{A}}{\text{cm}}$, on aura la relation suivante entre B_0 et H_0:

$$H_0 = 0{,}8\ B_0.$$

Après avoir déterminé la valeur de H pour chaque tronçon, on calcule la valeur de la force magnétisante d'après la formule de la loi de courant total :

$$Iw = H_0 l_0 + H_1 l_1 + H_2 l_2 + \ldots + H_n l_n.$$

Exemple. Calculer la force magnétisante de l'enroulement d'un électro-aimant représenté sur la figure 94. Les dimensions sont données

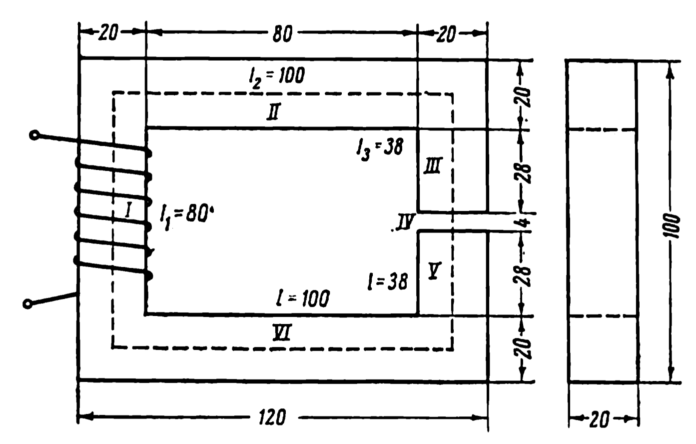


Fig. 94. Dessin se rapportant au calcul d'un circuit magnétique

en mm. Le noyau est en acier magnétique. Il est nécessaire de créer dans le noyau un flux magnétique de 60 000 Mx. On néglige la dispersion magnétique.

Traçons la ligne médiane suivant toute la longueur du circuit magnétique. Divisons le circuit en cinq tronçons et déterminons la longueur de chacun d'eux.

Puisque tous les tronçons sont traversés par un flux magnétique unique et qu'ils ont tous la même section (2 cm × 2 cm), l'induction est également partout la même :

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{60\,000 \text{ Mx}}{4 \text{ cm}^2} = 15\,000 \text{ gauss}.$$

D'après la courbe d'aimantation pour l'acier magnétique (fig. 91) on trouve que pour $B = 15\,000$ gauss l'intensité du champ magnétique $H = 30$ A/cm.

Pour l'entrefer on a :

$$H_0 = 0{,}8 \cdot 15\,000 = 12\,000 \frac{\text{A}}{\text{cm}}.$$

En multipliant les intensités du champ par les longueurs correspondantes des tronçons, on obtient les produits Hl pour ces

tronçons. On inscrit les résultats des calculs dans un tableau (tableau 14).

Tableau 14

n° du tronçon	Matériau	B	l	H	Hl
		Gs	cm	A/cm	A
I	Acier magnétique	15 000	8	30	240
II et VI	Idem	15 000	10×2	30	600
III et V	Idem	15 000	3,8×2	30	228
IV	Air	15 000	0,4	12 000	4800

$$Iw = \sum (Hl) = 5868 \text{ A.}$$

Il est à noter que pour les tronçons en acier magnétique I, II, III, V et VI dont la longueur totale est de 35,6 cm (8+20+7,6 cm) il faut une force magnétisante de 1068 A (240 A + 600 A + 228 A) pour faire passer le flux magnétique, tandis que l'entrefer de 4 mm seulement (89 fois plus court que la distance parcourue dans l'acier) exige une force magnétisante de 4800 A. On voit donc la nécessité d'avoir des circuits magnétiques avec des entrefers minimaux.

§ 65. AIMANTS PERMANENTS

Quelque temps après la découverte de l'existence d'un champ magnétique autour d'un conducteur parcouru par un courant on établit l'identité de l'action magnétique des courants et des aimants permanents. Plus tard, on vint à la conclusion que le courant électrique était à l'origine de tout champ magnétique. On abandonna alors l'ancienne notion selon laquelle des masses magnétiques positives et négatives sont respectivement concentrées dans les pôles nord et sud des aimants.

D'après les théories modernes, le champ magnétique d'un corps ferromagnétique aimanté (c'est-à-dire d'un aimant permanent) est principalement dû à la rotation des électrons autour de leur propre axe, ce qui équivaut à des courants élémentaires fermés.

Dans un corps non aimanté, les différents groupes de courants élémentaires et leurs champs magnétiques sont disposés chaotiquement. C'est pourquoi on ne peut remarquer le champ magnétique autour de tels corps.

Sous l'influence d'un champ magnétique extérieur, les courants élémentaires provoqués par la rotation des électrons

se disposent plus ou moins parallèlement l'un à l'autre et créent un champ magnétique résultant.

Un corps ferromagnétique possédant une aimantation rémanente est appelé *aimant permanent.*

Si on pose sur un aimant permanent un morceau de carton ou de verre saupoudré de limaille de fer, on pourra remarquer que les grains de limaille se disposent suivant des

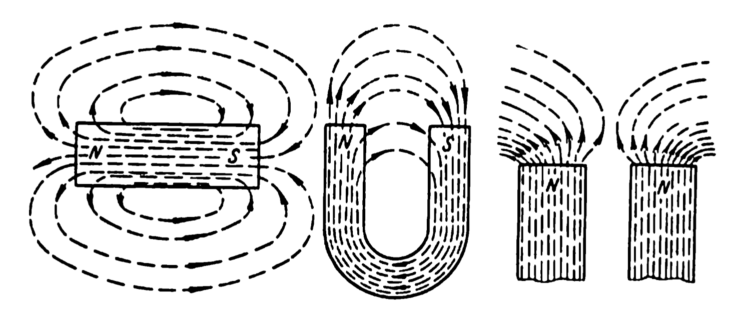


Fig. 95. Champ magnétique des aimants permanents

courbes allant d'un pôle de l'aimant à l'autre (fig. 95). Conventionnellement, il a été admis que les lignes d'induction sortent du pôle nord de l'aimant et entrent dans son pôle sud (fig. 95).

Les lignes d'induction possèdent les propriétés suivantes:

1) elles forment des courbes fermées, c.-à-d. qu'elles ne sont interrompues nulle part;

2) à l'intérieur de l'aimant, elles vont du pôle sud au pôle nord;

3) elles ont tendance à se raccourcir;

4) dans chaque point elles cherchent à agir l'une sur l'autre perpendiculairement à leur longueur;

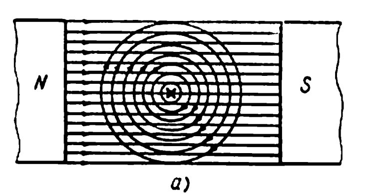
5) elles ne se croisent jamais.

§ 66. CONDUCTEUR PARCOURU PAR UN COURANT DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE

Lorsqu'on introduit un conducteur traversé par un courant dans un champ magnétique (fig. 96, *a*) on peut voir que par suite de l'addition des champs magnétiques de l'aimant et du conducteur le champ magnétique résultant est amplifié d'un côté du conducteur (en haut de la figure)

et affaibli de l'autre côté du conducteur (en bas de la figure). Grâce à l'interaction des deux champs magnétiques, les lignes d'induction seront incurvées et chercheront à repousser le conducteur vers le bas (fig. 96, *b*).

Le sens de la force agissant sur un conducteur parcouru par un courant et qui est introduit dans un champ magnétique peut être déterminé d'après la « règle de la main gauche ». *Si on dispose la main gauche de sorte que les lignes d'induction sortant du pôle nord entrent, pour ainsi dire, dans la paume et les quatre doigts allongés coïncident avec le sens du courant dans le conducteur, le pouce indiquera alors le sens de l'action de la force agissant sur le conducteur* (fig. 97).



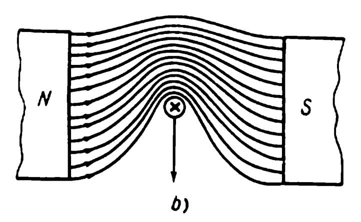


Fig. 96. Action d'un champ magnétique sur un conducteur parcouru par un courant

La figure 98 montre que le sens de cette force peut être changé soit en changeant les pôles, donc en changeant le sens du champ magnétique (fig. 98, *a*, *b*, *c*, *d*), soit en changeant le sens du courant dans le conducteur (fig. 98, *a* et *c*, ainsi que *b* et *d*).

Mais si on change simultanément les pôles de l'aimant et le sens du courant dans le conducteur, le sens de la force agissant sur le conducteur reste inchangé (fig. 98, *a* et *d*, ainsi que *b* et *c*).

La force ΔF agissant sur un élément de longueur Δl du conducteur dépend de la valeur de l'induction magnétique B, de l'intensité du courant I dans le conducteur, de l'élément de longueur Δl du conducteur et du sinus de l'angle α formé par l'élément de longueur Δl du conducteur et la direction du champ magnétique. Cette relation peut être exprimée par la formule :

$$\Delta F = BI\Delta l \sin \alpha.$$

Pour un conducteur rectiligne de longueur finie disposé perpendiculairement à un champ magnétique uniforme, la

force agissante sur le conducteur est:

$$F = BIl.$$

Cette relation permet de déterminer la formule aux dimensions de l'induction magnétique.

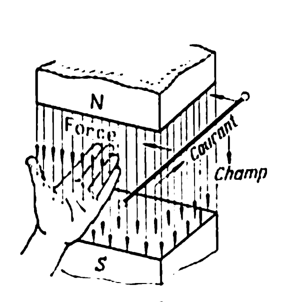


Fig. 97. Détermination du sens de la force agissant sur un conducteur d'après la « règle de la main gauche »

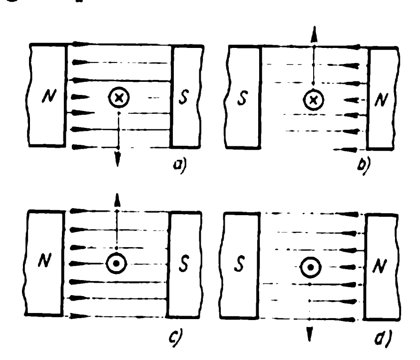


Fig. 98. Sens de la force agissant sur un conducteur parcouru par un courant dans un champ magnétique en fonction du sens du champ et du sens du courant dans le conducteur

Puisque la formule aux dimensions de la force est:

$$[F] = \frac{\text{J}}{\text{m}} = \frac{\text{W}\cdot\text{s}}{\text{m}} = \frac{\text{V}\cdot\text{A}\cdot\text{s}}{\text{m}},$$

celle de l'induction magnétique sera:

$$[B] = \frac{[F]}{[I]\,[l]}\,\frac{\frac{\text{V}\cdot\text{A}\cdot\text{s}}{\text{m}}}{\text{A}\cdot\text{m}} = \frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{m}^2},$$

c'est-à-dire que la formule aux dimensions de l'induction coïncide avec celle que donne la loi de Biot et Savart.

§ 67. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR ÉLECTRIQUE

Le moteur électrique est une machine qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique. Le premier moteur électrique a été construit en 1838 par l'académicien russe B. Jacobi. Tous les moteurs électriques utilisent le principe de l'interaction d'un conducteur parcouru par un courant et d'un champ magnétique. La figure 99 ché-

matise un moteur à courant continu. Le champ magnétique y est créé par les pôles *1* et *2* d'un électro-aimant.

Les conducteurs sont disposés dans les encoches de l'induit *3*. Lorsqu'on fait passer par les conducteurs de la partie supérieure de l'induit un courant dans le sens d'avant en arrière de la figure et dans la partie inférieure de l'induit un courant d'arrière en avant, les conducteurs de la partie

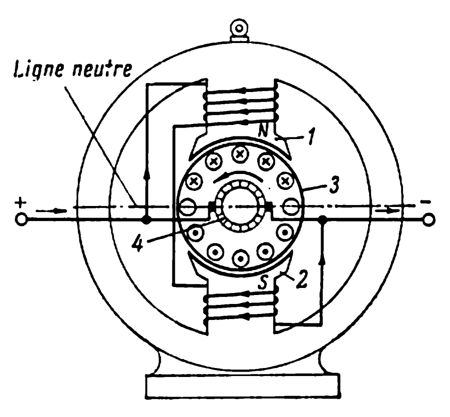


Fig. 99. Schéma d'un moteur électrique

supérieure sont, d'après la règle de la main gauche, repoussés du champ magnétique vers la gauche et les conducteurs de la partie inférieure le sont vers la droite. Etant donné que les conducteurs de l'induit se trouvent dans ses encoches, ils font tourner l'induit.

La figure 99 montre que lorsque le conducteur dans lequel le courant circule d'avant en arrière passe dans la partie inférieure et se dispose contre le pôle sud de l'électro-aimant, il est soumis à une force qui le repousse vers la gauche, ce qui empêche la rotation de l'induit. La même chose arrive avec le conducteur où le courant circule d'arrière en avant lorsqu'il pénètre dans la partie supérieure de l'induit en se disposant contre le pôle nord de l'électro-aimant. Aussi, afin d'obtenir la rotation faut-il faire de manière que le sens du courant dans le conducteur change aussitôt que ce dernier passe la ligne neutre. Dans les moteurs à courant continu on y arrive à l'aide d'un dispositif spécial, le collecteur *4*, auquel aboutissent les extrémités des conducteurs de l'induit.

§ 68. INTERACTION DES CONDUCTEURS PARCOURUS PAR DES COURANTS

Quand deux conducteurs parallèles parcourus par des courants de même sens sont disposés l'un près de l'autre les lignes d'induction qui les entourent cherchant à se raccourcir obligent les conducteurs à s'attirer l'un vers l'autre (fig. 100, *a*).

Les lignes de force de deux conducteurs parallèles traversés par des courants de sens contraires sont dirigées

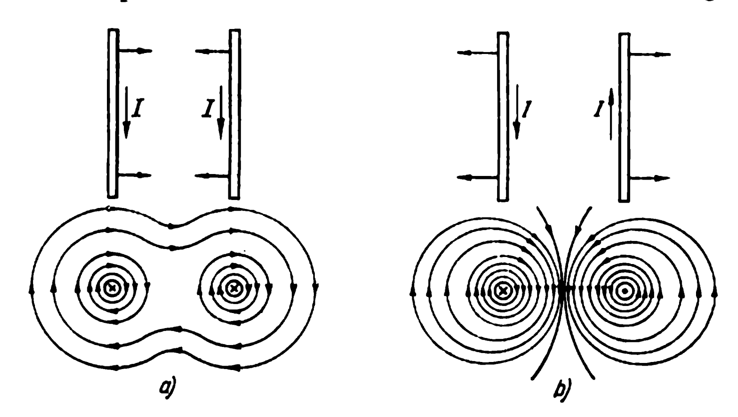


Fig. 100. Les forces s'exerçant entre deux conducteurs parcourus par des courants:
a — dirigés dans le même sens; *b* — dirigés dans les sens contraires

entre les conducteurs dans le même sens. Or, les lignes de force de même sens se repoussent. Donc, entre ces conducteurs il y aura répulsion (fig. 100, *b*).

Examinons l'interaction de deux fils parallèles disposés à une distance a l'un de l'autre et parcourus respectivement par les courants I_1 et I_2. Soit l la longueur des fils.

L'induction magnétique que crée le courant I_1 à l'endroit où passe le second conducteur est

$$B_1 = \mu\mu_0 \frac{I_1}{2\pi a}.$$

La force agissant sur le second conducteur est donc:

$$F_2 = lI_2B_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a}.$$

L'induction magnétique que crée le courant I_2 sur l'endroit où passe le premier conducteur est

$$B_2 = \mu\mu_0 \frac{I_2}{2\pi a} .$$

La force agissant sur le premier conducteur est donc

$$F_1 = B_2 l I_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a}$$

et est égale à la force F_2.

§ 69. MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES ET NON MAGNÉTIQUES

Dans les circuits magnétiques des machines et appareils électriques, radiotechniques et autres on utilise différents matériaux magnétiques et non magnétiques.

Les propriétés des matériaux magnétiques sont caractérisées par les valeurs de l'intensité du champ magnétique, du flux magnétique, de l'induction et de la perméabilité magnétique.

La relation entre l'induction magnétique et l'intensité du champ exprimée graphiquement est une courbe appelée *boucle d'hystérésis*. Cette courbe peut fournir certaines données caractérisant les propriétés magnétiques d'un matériau.

Dans les matériaux magnétiques un champ magnétique variable provoque des courants tourbillonnaires dits courants de Foucault. Ces courants échauffent les noyaux (les circuits magnétiques) causant une certaine perte de puissance.

Pour caractériser un matériau se trouvant dans un champ magnétique variable, on rapporte la valeur totale de la puissance perdue par hystérésis et par courants de Foucault à fréquence de 50 Hz à un kilogramme de ce matériau. Cette grandeur est appelée *pertes spécifiques* et s'exprime en W/kg.

L'induction magnétique de tout matériau magnétique ne doit pas dépasser une certaine valeur maximale dépendant de la nature et de la qualité de ce matériau. Les tentatives d'augmenter l'induction provoquent l'accroissement des pertes d'énergie dans le matériau et par conséquent, son échauffement.

Les matériaux magnétiques sont classés en deux catégories: les matériaux à faible force coercitive et ceux à force coercitive élevée.

Matériaux à faible force coercitive. Ces matériaux doivent:

1. Posséder une grande perméabilité magnétique relative μ permettant d'obtenir une grande induction magnétique B avec un nombre d'ampères-tours aussi faible que possible.

2. Avoir des pertes par hystérésis et par courants de Foucault minimales.

3. Posséder des propriétés magnétiques stables.

Ces matériaux servent à fabriquer les circuits magnétiques des machines électriques, les noyaux des transformateurs, les bobines d'inductance, les électro-aimants de relais, les appareils de mesures électriques, etc.

Ci-après nous décrivons quelques matériaux à faible force coercitive.

Le fer électrolytique est obtenu par électrolyse du sulfate ferrique ou du chlorure ferreux, les produits d'électrolyse étant ensuite fondus sous vide. Le fer électrolytique broyé en poudre sert à fabriquer des pièces magnétiques de façon analogue à la fabrication des pièces en céramique ou en matières plastiques.

Le fer carbonyle est obtenu sous forme de poudre après la décomposition thermique d'une substance qui comprend du fer, du carbone et de l'oxygène [$Fe(CO_5)$]. A une température de 1200 °C, le fer carbonyle en poudre est fritté et sert à la fabrication des mêmes pièces que l'on fabrique en fer électrolytique. Le fer carbonyle se distingue par une grande pureté et une plasticité élevée; il est utilisé dans l'industrie de tubes à vide, ainsi que pour la fabrication des appareils de laboratoire.

Les deux sortes de fer très pur (électrolytique et carbonyle) que nous venons d'examiner contiennent 0,05 % d'impuretés au maximum.

Les tôles d'acier magnétique sont le matériau le plus répandu dans la construction des machines électriques et des transformateurs. L'acier magnétique est allié avec du silicium pour améliorer ses propriétés magnétiques et réduire les pertes par hystérésis. De plus, grâce à l'introduction du silicium, la résistivité de l'acier augmente, ce qui réduit les pertes par courants de Foucault. L'épais-

seur des tôles est de 0,3 ou de 0,5 mm en fonction de la nuance de l'acier. L'acier laminé à froid et recuit ensuite dans l'hydrogène présente des propriétés magnétiques très élevées. Ceci s'explique par le fait que les cristaux du métal se disposent parallèment au sens de laminage. Un tel acier est désigné par les lettres ХВП (laminé à froid, à haute perméabilité, texturé). Les dimensions des tôles d'acier sont de 1000 × 700 à 2000 × 1000 mm.

Les nuances d'acier magnétique étaient auparavant désignées comme suit: Э3А, Э1АБ, Э4АА. La lettre Э signifie acier magnétique; la lettre А signifie pertes de puissance réduites dans un champ magnétique alternatif; les lettres АА signifient pertes particulièrement réduites; la lettre Б signifie induction magnétique augmentée; les chiffres 1 — 4 indiquent la quantité de silicium en pourcent contenu dans l'acier.

La norme soviétique en vigueur contient des nouvelles désignations des nuances d'acier magnétique. Par exemple: Э11, Э21, Э320, Э370, Э43. La lettre Э signifie acier magnétique; les premiers chiffres désignent: 1 — faiblement allié au silicium; 2 — moyennement allié au silicium; 3 — à teneur augmentée de silicium et 4 — hautement allié au silicium. Les deuxièmes chiffres dans la désignation des nuances indiquent les propriétés magnétiques et électriques garanties des aciers: 1, 2, 3 — pertes spécifiques lors du cycle d'inversion d'aimantation de l'acier à la fréquence de 50 Hz et induction magnétique dans des puissants champs, 4 — pertes spécifiques lors du cycle d'aimantation à la fréquence de 400 Hz et induction magnétique dans des champs moyens; 5, 6 — perméabilité magnétique dans des champs faibles (*H* inférieur à 0,01 A/cm); 7, 8 — perméabilité magnétique dans des champs moyens (*H* de 0,1 à 1 A/cm). Le troisième chiffre 0 signifie: acier laminé à froid, texturé.

L e p e r m a l l o y est un alliage de fer et de nickel. La composition approximative du permalloy est la suivante: 30 à 80 % de nickel, 10 à 18 % de fer, le reste étant le cuivre, le molybdène, le manganèse et le chrome. Le permalloy est facilement usiné et est produit sous forme de tôles. Il possède une très grande perméabilité magnétique dans de faibles champs magnétiques (jusqu'à 200 000 H/cm). Le permalloy sert à fabriquer les pièces utilisées en téléphonie et en radiotechnique, les noyaux de transformateurs,

les bobines d'inductance, les relais et les pièces d'appareils de mesure électriques.

L' a l s i f e r est un alliage d'aluminium, de silicium et de fer. Il comprend approximativement 9,5 % de silicium, 5,6 % d'aluminium, le reste étant du fer. L'alsifer est un alliage dur et fragile, difficile à usiner. Les bonnes qualités de l'alsifer sont les suivantes: une perméabilité élevée dans de faibles champs magnétiques (jusqu'à 110 000 H/cm), une grande résistivité ($\rho = 0{,}81$ ohm $\times$ $\times$ mm^2/m), l'absence dans sa composition des métaux déficitaires. L'alsifer est utilisé pour la fabrication des noyaux destinés aux appareils à haute fréquence.

L e p e r m e n d u r est un alliage de fer, de cobalt et de vanadium (50 % de cobalt, 1,8 % de vanadium, le reste étant du fer). Le permendur est produit sous forme de tôles, de bandes et de rubans. Il sert à fabriquer les noyaux d'électro-aimants, certaines pièces des haut-parleurs, les membranes des tubes d'écouteurs, les oscillographes, etc.

L e s m a g n é t o d i é l e c t r i q u e s (appelés parfois ferrites) sont des matériaux à faible force coercitive broyés en petits grains (poudre), isolés les uns des autres par une résine ou un autre liant. Comme poudre de matériau magnétique on utilise le fer électrolytique, le fer carbonyle, le permalloy, l'alsifer, la magnétite (le minerai $FeO \cdot Fe_2O_3$). Comme liant isolant on utilise la gomme-laque, les résines de phénol-formaldéhyde, le polystyrène, le verre liquide, etc. La poudre de matériau magnétique est mélangée avec le liant isolant et la pâte obtenue est utilisée pour la fabrication, sous pression, des noyaux de transformateurs, des bobines d'arrêt et de différentes pièces d'appareillage radioélectrique. Grâce à leur structure grenue, les ferrites subissent de faibles pertes par courants de Foucault, lorsqu'ils sont introduits dans des champs magnétiques engendrés par des courants à haute fréquence.

Matériaux à force coercitiveélevée. Ces matériaux sont utilisés pour la fabrication des aimants permanents. Ils doivent:

1. Posséder une grande induction rémanente.
2. Avoir une énergie magnétique élevée.
3. Posséder des propriétés magnétiques stables.

Pour la fabrication des aimants permanents c'est l'acier au carbone (0,4 à 1,7 % de carbone, le reste étant du fer)

qui est le matériau qui coûte le moins cher. Les aimants fabriqués en acier au carbone possèdent de faibles propriétés magnétiques et ils les perdent rapidement sous l'effet de l'échauffement, des chocs et des secousses.

Les aciers alliés possèdent des propriétés magnétiques plus élevées et pour la fabrication des aimants permanents ils sont utilisés plus souvent que l'acier au carbone. Entre autres ce sont: l'acier au chrome, l'acier au tungstène, l'acier au cobalt et l'acier au cobalt-molybdène.

Pour la fabrication des aimants permanents, on utilise aussi des alliages à base du fer, du nickel et de l'aluminium. Ces alliages sont très durs et en même temps très fragiles et, pour cette raison, ils ne peuvent être usinés que par rectification. Les alliages possèdent des propriétés magnétiques remarquables et une grande énergie magnétique par unité de volume.

Dans le tableau 15 est indiquée la composition de quelques matériaux à force coercitive élevée, qui sont utilisés pour la fabriction des aimants permanents.

Tableau 15

Composition chimique de certains matériaux à force coercitive élevée

Matériau	Composition chimique en pour-cent de poids	Poids relatif par unité d'énergie magnétique
Acier au carbone	0,45 C, le reste étant du Fe	26,7
Acier au chrome	2-3 Cr; 1 C	17,2
Acier au tungstène	5 W; 1 C	15,8
Acier au cobalt	5-30 Co; 5-8 Cr; 1,5-5 W	5,1-12,6
Acier au cobalt-molybdène	13-17 Mo; 10-12 Co	3,8
Alni	12,5 Al; 25 Ni; 5 Cu	3,6
Alnisi	14 Al; 34 Ni; 1 Si	3,4
Alnico	10 Al; 17 Ni; 12 Co; 6 Cu	3,1
Magnico	24 Co; 13 Si; 8 Al; 3 Cu	1

Matériaux non magnétiques. Certains appareils électrotechniques exigent des matériaux exempts de propriétés magnétiques. Les matières plastiques et les métaux non ferreux (aluminium, laiton, bronze) conviennent à ces fins.

Mais ils possèdent une faible résistance mécanique et certains d'entre eux sont déficitaires. Pour cette raison, on les remplace par l'acier non magnétique ou par la fonte non magnétique.

La composition approximative de l'acier non magnétique est la suivante : 0,25 à 0,35 % de carbone, 22 à 25 % de nickel, 2 ou 3 % de chrome, le reste étant du fer. L'acier non magnétique est utilisé pour le serrage et la fixation des transformateurs, des bobines d'arrêt, des bobines d'inductance, etc.

La composition approximative de la fonte non magnétique est la suivante : 2,6 à 3 % de carbone, 2,5 % de silicium, 5,6 % de manganèse, 9 à 12 % de nickel, le reste étant du fer.

La fonte non magnétique est utilisée pour la fabrication de couvercles, d'enveloppes, de douilles, de disjoncteurs ainsi que de boîtes d'extrémités et d'enveloppes de transformateurs de soudage.

Problèmes

1. Calculer l'intensité du champ magnétique créé par un courant de 100 A traversant un long conducteur rectiligne en un point éloigné de 10 cm du conducteur.

2. Quelle est l'intensité du champ magnétique créé par un courant de 20 A traversant un conducteur annulaire de 5 cm de rayon en un point situé au centre de la spire ?

3. Déterminer le flux magnétique passant dans une pièce de nickel placée dans un champ magnétique uniforme dont l'intensité est de 500 A/m. La section de la pièce de nickel est de 25 cm². La perméabilité magnétique relative du nickel est de 300.

4. Un conducteur rectiligne, long de 40 cm, est placé dans un champ magnétique uniforme sous un angle de 30° par rapport à la direction du champ magnétique. Le conducteur est parcouru par un courant de 50 A. L'induction du champ est de 5000 Gs. Quelle est la force avec laquelle le conducteur est repoussé hors du champ magnétique ?

5. Quelle est la force de répulsion mutuelle entre deux conducteurs rectilignes et parallèles disposés dans l'air. La longueur des conducteurs est de 2 m et la distance qui les sépare est de 20 cm. Les conducteurs sont traversés par des courants de 10 A chacun.

Questions de contrôle

1. Quelle est l'expérience qui nous permet de constater qu'autour d'un conducteur parcouru par un courant existe un champ magnétique ?

2. Quelles sont les propriétés des lignes d'induction ?

3. Comment peut-on déterminer le sens des lignes d'induction ?

4. Qu'est-ce qu'un solénoïde et quel est son champ magnétique ?
5. Comment peut-on déterminer les pôles d'un solénoïde ?
6. Qu'est-ce qu'un électro-aimant et comment peut-on déterminer ses pôles ?
7. Qu'entend-on par hystérésis ?
8. Quelles sont les différentes formes des électro-aimants ?
9. Quelle est l'interaction des conducteurs parcourus par des courants électriques ?
10. A quelle action est soumis un conducteur traversé par un courant dans un champ magnétique ?
11. Comment peut-on déterminer le sens d'une force agissant sur un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique ?
12. Quel est le principe de fonctionnement des moteurs électriques ?
13. Quels corps sont appelés ferromagnétiques ? Paramagnétiques ? Diamagnétiques ?

CHAPITRE VI

INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

§ 70. PRODUCTION D'UNE FORCE ÉLECTROMOTRICE D'INDUCTION

Prenons un barreau aimanté *1* (fig. 101, *a*) et introduisons-le dans une bobine *2* (solénoïde). On voit que l'aiguille du galvanomètre *3* branché dans le circuit dévie (par exemple, à droite). Cela indique l'apparition d'une F.É.M. et d'un courant dans le solénoïde.

Dès que l'on immobilise le barreau l'aiguille du galvanomètre revient à zéro (fig. 101, *b*). Cela prouve que pour produire une F.É.M. d'induction il ne suffit pas d'avoir un champ magnétique et un conducteur, il faut encore qu'ils se déplacent l'un par rapport à l'autre.

En retirant le barreau aimanté de la bobine (fig. 101, *c*) on peut voir que l'aiguille du galvanomètre dévie de nouveau, mais, cette fois, en sens inverse (à gauche). Cela prouve que le sens de la F.É.M. d'induction dépend du sens de mouvement du champ magnétique traversant un conducteur immobile par rapport à ce dernier ou de celui de mouvement du conducteur qui coupe le champ magnétique.

Dans cette expérience nous avons vu que l'aiguille du galvanomètre déviait à droite si le pôle nord de l'aimant permanent introduit dans la bobine était dirigé vers le bas (fig. 101, *a*). Maintenant tournons l'aimant de sorte que le pôle nord soit dirigé vers le haut et introduisons-le de nouveau dans la bobine. On verra que l'aiguille du galvanomètre dévie dans le sens contraire, c'est-à-dire à gauche (fig. 101, *d*). Cela prouve que le sens de la F.É.M. d'induction dépend également du sens du champ magnétique.

L'apparition d'une force électromotrice dans un circuit fermé lorsqu'il est coupé par un champ magnétique est due à un phénomène découvert par le physicien anglais M. Faraday, en 1831, et qui a été appelé *induction électromagnétique*.

Si on approche d'un conducteur fermé *1* (fig. 102) non parcouru par un courant ou si on en éloigne un conducteur *2* traversé par un courant, une F.É.M. sera induite dans le conducteur *1*. Une F.É.M. sera également induite dans le conducteur *1* dans le cas où les deux conducteurs *1* et *2*

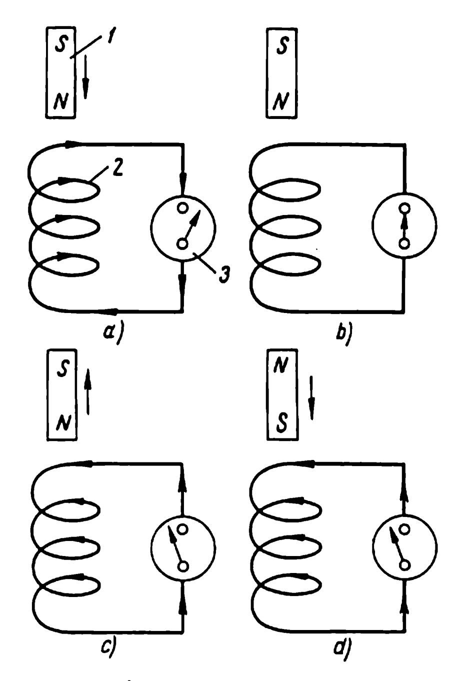


Fig. 101. Sens de la F.É.M. induite en fonction du sens du champ magnétique et du sens de mouvement du champ magnétique par rapport au conducteur

restent immobiles et que l'on fait varier l'intensité du courant, on coupe ou on ferme le circuit du conducteur *2*. L'induction d'une F.É.M. dans le second circuit fermé par suite de la variation du courant dans le premier circuit est appelée *induction mutuelle*. Elle a lieu, par exemple, dans les transformateurs, les bobines d'inductance, etc. On peut obtenir une F.É.M. induite aussi par la méthode suivante.

On sait qu'un conducteur parcouru par un courant électrique est entouré d'un champ magnétique. Lorsqu'on change l'intensité ou le sens de ce courant ou lorsqu'on

ouvre ou on ferme le circuit électrique alimentant le conducteur, le champ magnétique entourant le conducteur varie. Mais ce champ magnétique traverse le conducteur lui-même et en variant il y induit une F.É.M. Ce phénomène

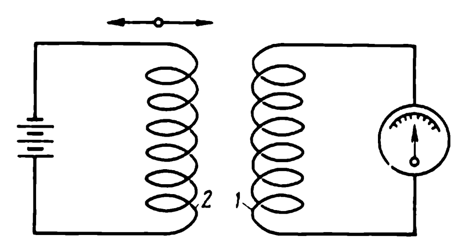


Fig. 102. Induction mutuelle

est appelé *induction propre* (on dit aussi auto-induction ou self-induction). La F.É.M. induite de cette façon est appelée F.É.M. d'induction propre ou F.É.M. d'auto-induction.

§ 71. SENS ET GRANDEUR D'UNE F.É.M. INDUITE

Une F.É.M. induite apparaît dans les trois cas suivants:

1. Lorsqu'un conducteur en mouvement traverse un champ magnétique fixe ou, au contraire, lorsqu'un champ magnétique mobile traverse un conducteur fixe, ou, enfin, lorsqu'un conducteur mobile et un champ magnétique mobile se déplacent dans l'espace l'un par rapport à l'autre.
2. Lorsqu'un champ magnétique variable d'un conducteur agit sur un autre conducteur en induisant dans ce dernier une F.É.M. (induction mutuelle).
3. Lorsqu'un champ magnétique variable d'un conducteur induit une F.É.M. dans le conducteur lui-même (induction propre).

Ainsi, toute variation dans le temps du flux magnétique traversant un circuit fermé (spire, cadre) est accompagnée de l'apparition, dans ce circuit, d'une F.É.M. induite.

Comme nous l'avons déjà indiqué, le sens de la F.É.M. induite dépend de la direction du mouvement du conducteur et de celle du champ magnétique.

Pour déterminer le sens de la F.É.M. induite dans un conducteur on peut utiliser la « règle de la main droite ». Cette règle s'énonce ainsi: *si on dispose mentalement la main*

droite dans le champ magnétique le long du conducteur de sorte que les lignes d'induction sortant du pôle nord entrent dans la paume et que le pouce coïncide avec la direction du mouvement du conducteur, les quatre doigts allongés indiqueront le sens de la F.É.M. induite dans ce conducteur (fig. 103).

Dans le cas où le conducteur reste immobile et le champ magnétique se déplace, pour déterminer le sens de la F.É.M. induite il faut supposer que le champ reste immobile et que le conducteur se déplace dans le sens opposé au mouvement du champ, et ensuite appliquer la règle de la main droite.

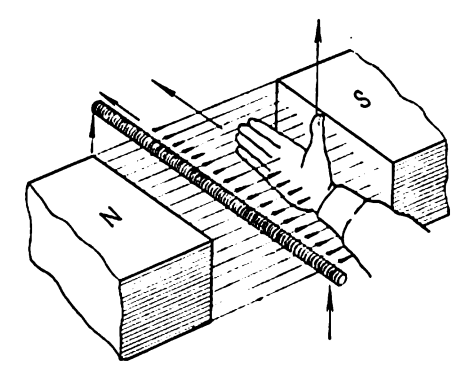


Fig. 103. Détermination du sens de la F.É.M. induite dans un conducteur d'après la « règle de la main droite »

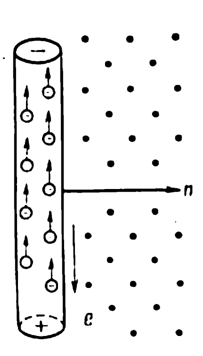


Fig. 104. Induction électromagnétique dans un conducteur

La théorie électronique explique également le phénomène d'induction d'une force électromotrice.

Plaçons un conducteur dans un champ magnétique. Les électrons libres du conducteur se trouveront en mouvement thermique désordonné. Les charges positives et les charges négatives sont réparties uniformément dans tout le volume du conducteur et se neutralisent mutuellement. Déplaçons le conducteur à une vitesse déterminée dans un champ magnétique uniforme dans la direction *n* (fig. 104) perpendiculairement au vecteur d'induction magnétique. Les lignes d'induction représentées par des points sont dirigées d'arrière en avant de la figure. Les atomes, leurs noyaux et les électrons se déplacent avec le conducteur.

Dans ce cas, sur les charges électriques du conducteur agit une force sous l'action de laquelle les électrons libres

acquièrent une composante de vitesse complémentaire et se déplacent le long du conducteur.

Tandis que les charges positives liées au réseau cristallin du conducteur ne peuvent pas se déplacer par rapport au conducteur les électrons libres, eux, peuvent le faire.

Dans l'exemple considéré, les électrons se déplacent du bout inférieur du conducteur vers son bout supérieur, ce qui correspond au sens du courant du haut en bas. Comme il est facile de s'en persuader, le sens de la F.É.M. d'induction et du courant dans le conducteur correspond à la règle de la main droite.

La valeur de la F.É.M. induite dans le conducteur dépend :

1) de la valeur de l'induction B du champ magnétique, car plus les lignes d'induction sont denses, plus le nombre de lignes traversées par le conducteur en une unité de temps (seconde) est grand ;

2) de la vitesse du mouvement v du conducteur dans le champ magnétique, car ayant une grande vitesse le conducteur peut couper un plus grand nombre de lignes d'induction par seconde ;

3) de la longueur utile (se trouvant dans le champ magnétique) l du conducteur, car un conducteur long peut couper un plus grand nombre de lignes d'induction par seconde ;

4) de la valeur de sinus de l'angle α entre la direction du mouvement du conducteur et la direction du champ magnétique (fig. 105).

Décomposons le vecteur de la vitesse du conducteur dans le champ magnétique en deux composantes : v_n — composante normale à la direction du champ ($v_n = v \cdot \sin \alpha$) et v_t — composante tangentielle ($v_t = v \cdot \cos \alpha$). La composante v_t ne participe pas à la création de la F.É.M., car lors du mouvement sous l'action de la composante tangentielle le conducteur se déplacerait parallèlement au vecteur B et, par conséquent, ne les couperait pas.

La valeur de la F.É.M. induite peut être calculée d'après la formule :

$$e = Blv \sin \alpha \text{ V}.$$

Ayant pris connaissance du phénomène d'induction électromagnétique, considérons encore une fois le processus

de transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique.

Soit un conducteur rectiligne AB (fig. 106) parcouru par un courant venant d'une source de tension et introduit

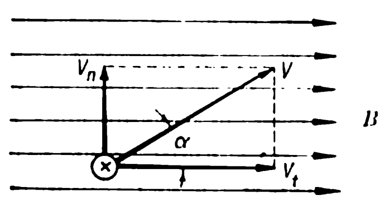


Fig. 105. Décomposition de la vitesse de mouvement d'un conducteur dans un champ magnétique

dans un champ magnétique extérieur. Si le conducteur est immobile, l'énergie de la source de tension est dépensée exclusivement pour l'échauffement du conducteur:

$$A = UIt = I^2rt \text{ joules.}$$

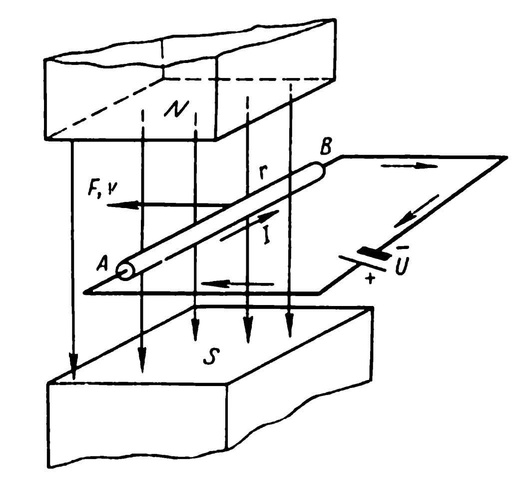


Fig. 106. Transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique

La puissance dépensée est donc:

$$P_{\text{él}} = UI = I^2r \text{ W},$$

d'où on détermine le courant dans le circuit:

$$I = \frac{U}{r} \text{ A.} \tag{a}$$

Mais on sait qu'un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force exercée par le champ et tendant à déplacer le conducteur dans un sens que permet de déterminer la règle de la main gauche. Lors de son mouvement, le conducteur coupe les lignes d'induction et, d'après la loi d'induction électromagnétique, une F.É.M. induite apparaît dans ce conducteur. Le sens de cette F.É.M., déterminé d'après la règle de la main droite, est opposé au sens du courant I. Appelons-la la F.É.M. contraire E_c. D'après la loi d'induction électromagnétique, la valeur de E_c est:

$$E_c = Blv \text{ V}.$$

D'après la deuxième loi de Kirchhoff pour un circuit fermé, on a:

$$U - E_c = Ir$$

ou

$$U = E_c + Ir, \qquad \text{(b)}$$

D'où le courant dans le circuit

$$I = \frac{U - E_c}{r}. \qquad \text{(c)}$$

En comparant les expressions (a) et (c) on voit que dans un conducteur se déplaçant dans un champ magnétique le courant est inférieur au courant dans un conducteur immobile pour les mêmes valeurs de U et de r.

En multipliant membre à membre l'expression (b) par I, on obtient:

$$UI = E_c \cdot I + I^2 r.$$

Puisque $E_c = Blv$, on a:

$$UI = BlvI + I^2 r.$$

Etant donné que $BlI = F$ et $Fv = P_{méc}$, on a:

$$UI = Fv + I^2 r$$

ou

$$P = P_{méc} + P_{él}.$$

Cette dernière expression montre que lorsqu'un conducteur parcouru par un courant se déplace dans un champ magnétique, la puissance de la source de tension est transformée en puissance mécanique et en puissance thermique.

§ 72. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE GÉNÉRATRICE DE COURANT CONTINU

On appelle génératrice une machine transformant l'énergie mécanique en énergie électrique. Le fonctionnement d'une génératrice repose sur l'utilisation des phénomènes d'induction électromagnétique. Dans une génératrice, l'induit *1* (fig. 107) avec son enroulement est entraîné par un moteur primaire et tourne dans le champ magnétique

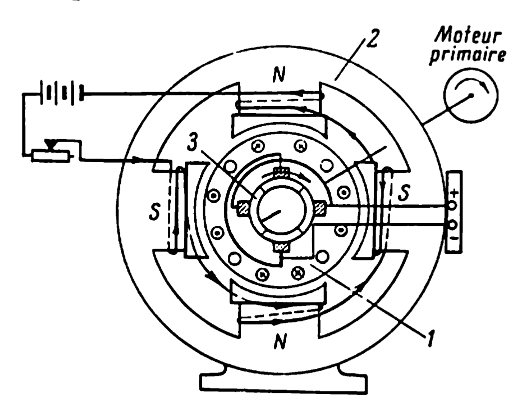


Fig. 107. Schéma d'une génératrice à courant continu

des pôles *N* et *S* des électro-aimants *2*. La force électromotrice induite dans l'enroulement de l'induit est dirigée vers le circuit extérieur par l'intermédiaire d'un collecteur *3* et des balais. Le collecteur permet d'obtenir dans le circuit extérieur un courant continu.

Pour actionner la génératrice, on peut utiliser comme moteur primaire une machine à vapeur, une turbine à vapeur, une turbine hydraulique, un moteur à combustion interne, une éolienne, un moteur électrique.

§ 73. LOI DE LENZ

En 1834, l'académicien russe E. Lenz, connu par ses études des phénomènes électromagnétiques, formula une règle générale permettant de déterminer le sens de la F.É.M. induite dans un conducteur. Cette règle, dite loi de Lenz, peut être énoncée ainsi :

Le sens d'une F.É.M. induite est toujours tel que les sens du courant qu'elle produit et de son champ magnétique tendent à s'opposer à la cause provoquant cette F.É.M. induite.

La loi de Lenz est confirmée par les faits suivants:

1. Si on introduit un conducteur dans un champ magnétique comme il est indiqué sur la figure 108, le conducteur, en se déplaçant vers le bas, coupe ce champ. Dans le conducteur est alors induite une F.É.M. dont le sens peut être déterminé d'après la règle de la main droite. Dans le cas considéré, le sens de la F.É.M. induite et, par conséquent, celui du courant sont dirigés d'arrière en avant de la figure.

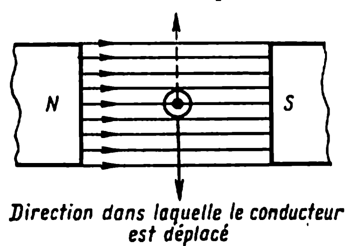


Fig. 108. Opposition d'un conducteur parcouru par un courant induit à son propre mouvement

Examinons maintenant le comportement du conducteur dans le champ magnétique. On sait que, parcouru par un courant, il est toujours repoussé hors du champ. La direction dans laquelle il est repoussé peut être déterminée d'après la règle de la main gauche. Dans le cas considéré la force de répulsion est dirigée vers le haut. Ainsi, le courant induit, en agissant sur le champ magnétique, s'oppose au mouvement du conducteur, donc il s'oppose à la cause provoquant ce courant.

2. Montons le circuit représenté à la figure 109. En introduisant un barreau aimanté dans une bobine (le pôle nord étant dirigé vers le bas), nous constatons une déviation de l'aiguille du galvanomètre. L'expérience montre que le sens du courant induit dans la bobine correspond au sens indiqué par les flèches sur la fig. 109, *a*. Admettons qu'à ce sens corresponde une déviation de l'aiguille à gauche de sa position zéro (position de milieu). Dans ce cas la bobine devient en quelque sorte un solénoïde et le courant

de sens indiqué crée dans sa partie supérieure un pôle nord et dans sa partie inférieure un pôle sud. Etant donné que les pôles de même nom du barreau et du solénoïde se repoussent mutuellement, le courant induit dans la bobine s'oppose au mouvement du barreau aimanté, c'est-à-dire qu'il s'oppose à la cause qui l'a provoqué.

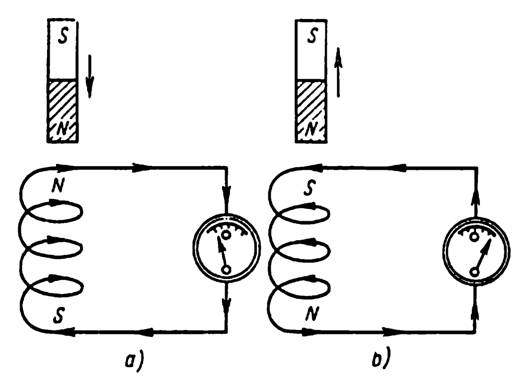


Fig. 109. Opposition d'un solénoïde au mouvement d'un barreau aimanté:
a — vers le bas; *b* — vers le haut

Si l'on retire le barreau de la bobine, l'aiguille du galvanomètre dévie à droite (fig. 109, *b*). L'expérience montre qu'à cette déviation de l'aiguille du galvanomètre correspond le sens du courant induit indiqué par des flèches sur la figure 109, *b* et qui est contraire au sens du courant de la figure 109, *a*.

En déterminant les pôles de la bobine d'après la « règle du tire-bouchon », on trouve que le pôle sud est maintenant dans la partie supérieure et le pôle nord dans la partie inférieure de la bobine. Les pôles opposés de l'aimant et du solénoïde s'attirent et freinent ainsi le mouvement de l'aimant. Donc, dans ce cas aussi, le courant induit s'oppose à la cause qui l'a provoqué.

3. En fermant le circuit *I* (fig. 110, *a*) faisons passer le courant par le conducteur *AB*. Le sens du courant est indiqué par des flèches. En se propageant dans tous les sens, le champ magnétique du conducteur *AB* créé par ce courant traverse le conducteur *CD* et dans le circuit *II* apparaît une F.É.M. induite. Puisque le circuit *II* est

fermé sur le galvanomètre, un courant y apparaît. Le galvanomètre est branché de la même façon que dans l'expérience précédente.

En déviant à gauche l'aiguille indique que le courant circule à travers le galvanomètre de haut en bas. En comparant les sens des courants dans les conducteurs *AB* et *CD*, on voit que les courants y sont dirigés en sens inverses. On sait que deux conducteurs parcourus par des courants de sens contraires se repoussent mutuellement. Pour cette raison, le conducteur *CD* parcouru par un courant induit a tendance à s'éloigner du conducteur *AB* (tandis que le conducteur *AB* tend à s'éloigner du conducteur *CD*) et à supprimer l'influence du champ dû au conducteur *AB*, c'est-à-dire qu'il s'oppose à la cause qui a provoqué le courant induit.

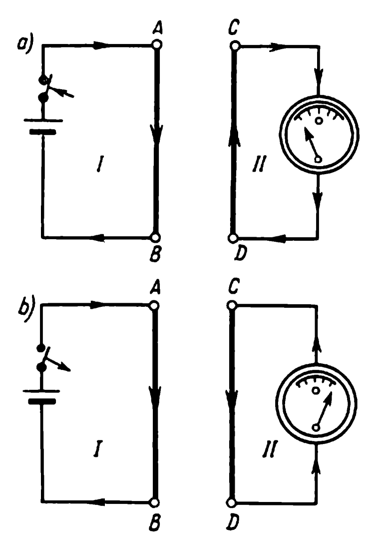


Fig. 110. Apparition d'un courant induit dans le circuit *II* : *a* — à l'instant de fermeture du circuit *I*; *b* — à l'instant d'ouverture du circuit *I*

Le courant induit dans le circuit *II* circule pendant un temps très court. Aussitôt que le flux magnétique du conducteur *AB* prend une valeur fixe, le champ magnétique du conducteur *AB* cesse de traverser le conducteur *CD* et le courant dans le circuit *II* disparaît.

En cas d'ouverture du circuit *I*, le courant disparaissant provoque une diminution du champ magnétique dont les lignes d'induction, en coupant le conducteur *CD*, y créent un courant induit. Le sens de ce courant coïncide avec celui du conducteur *AB* (fig. 110, *b*).

On sait que deux conducteurs parcourus par des courants de même sens s'attirent. Aussi, le conducteur *CD* tendra-t-il à s'approcher du conducteur *AB* afin de maintenir son champ magnétique qui diminue.

4. Prenons une bobine avec un noyau de section circulaire formé de fils d'acier sur lequel est placée une bague

d'aluminium (fig. 111). Au moment où l'on ferme le circuit, l'enroulement de la bobine commence à être parcouru par un courant électrique créant un champ magnétique, dont les lignes d'induction traversent la bague d'aluminium et y induisent un courant. La bague d'aluminium est parcourue par un courant induit dont le sens est contraire à celui du courant dans les spires de la bobine. Les conducteurs parcourus par des courants de sens opposés se repoussent. Pour cette raison, à l'instant où la bobine est mise sous tension, la bague d'aluminium fait un bond vers le haut.

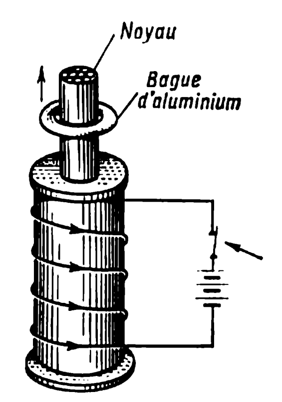


Fig. 111. Une bague d'aluminium placée librement sur le noyau de fer d'une bobine fait un bond vers le haut à l'instant de fermeture du circuit

On sait maintenant que toute variation dans le temps du flux magnétique traversant un circuit fermé produit dans ce dernier une F.É.M. d'induction déterminée par l'égalité :

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

L'expression $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ représente la vitesse moyenne de la variation dans le temps du champ magnétique. Plus l'intervalle de temps Δt est petit, moins la F.É.M. indiquée diffère de sa valeur réelle à l'instant donné. Le signe « moins » devant l'expression $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ indique le sens de la F.É.M. induite, c'est-à-dire correspond à la loi de Lenz.

En cas d'accroissement du flux magnétique, l'expression $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ est positive et la F.É.M. est négative. C'est en ceci que consiste la loi de Lenz : la F.É.M. et le courant induit s'opposent à la cause qui les a provoqués.

En cas d'une variation uniforme dans le temps du flux magnétique, le rapport $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ est constant. La valeur absolue de la F.É.M. dans le conducteur est alors :

$$e = \frac{\Phi}{t}.$$

La formule aux dimensions du flux magnétique est :

$$[\Phi] = [e \cdot t] = \mathrm{V \cdot s} \text{ ou weber.}$$

Si l'on dispose d'une bobine comprenant w spires, la valeur de la F.É.M. induite est :

$$e = -w \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Le produit du nombre de spires de la bobine par le flux magnétique qui les embrasse est appelé *flux embrassé* (ou encerclement du flux ou, enfin, flux à travers la bobine) et est désigné par la lettre ψ. Alors la loi d'induction électromagnétique peut s'écrire sous une autre forme :

$$e \quad -\frac{\Delta\psi}{\Delta t}.$$

§ 74. COURANTS DE FOUCAULT

En étudiant le principe de fonctionnement d'une génératrice, nous avons vu qu'une F.É.M. est induite dans les conducteurs de l'enroulement de l'induit qui traversent un champ magnétique. Puisque l'induit en acier coupe les mêmes lignes d'induction il doit lui-même être le siège des courants induits. Les courants induits dans des corps métalliques lorsque ceux-ci sont coupés par des lignes d'induction sont appelés *courants tourbillonnaires* ou courants de Foucault.

La figure 112 schématise un induit tournant dans un champ magnétique. Les courants de Foucault dans l'induit, indiqués conventionnellement par des flèches en pointillé, passent par le corps de l'induit et l'échauffent, ce qui demande une certaine énergie. Si l'on ne prend pas de mesures convenables pour réduire les courants de Foucault, ceux-ci peuvent, en chauffant fortement l'induit, provoquer la dégradation de l'isolation de son enroulement. Il est impossible de faire disparaître complètement les pertes par courants de Foucault, mais on peut les réduire.

Afin de diminuer ces pertes, les induits des génératrices et des moteurs électriques, ainsi que les noyaux des transformateurs, sont assemblés en tôles d'acier doux de faible épaisseur (0,35 ou 0,5 mm) découpées et disposées dans le sens des lignes du flux magnétique et isolées les unes des autres par du vernis ou du papier fin. Cela se fait pour

réduire, grâce à la faible épaisseur de chaque tôle, la valeur du flux qui la traverse et pour réduire ainsi la F.É.M. et le courant induits.

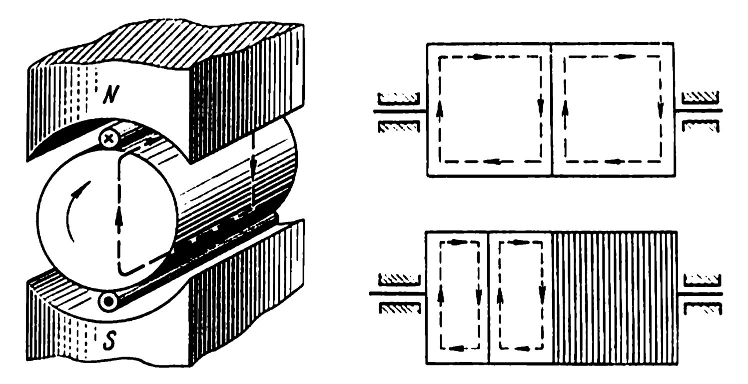


Fig. 112. Apparition des courants de Foucault dans un induit de fer plein d'une machine électrique

Fig. 113. La variation du chemin des courants de Foucault lorsque l'induit en fer d'une machine électrique est divisé en tronçons isolés. Les flèches indiquent les sens des courants d'induction

Le chemin parcouru par les courants de Foucault dans les différentes parties isolées de l'induit est schématisé sur la figure 113.

Pour réduire davantage les courants de Foucault, on augmente la résistivité de l'acier en lui ajoutant

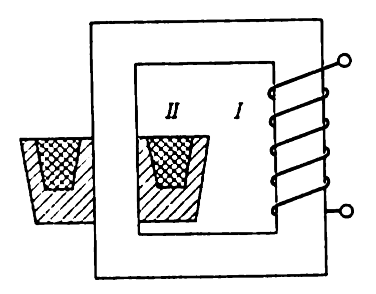


Fig. 114. Schéma d'un four à induction

environ 4 % de silicium. Un tel acier est appelé acier allié.

Mais les courants de Foucault ne jouent pas toujours un rôle négatif ; dans certains cas on leur trouve un emploi

utile. Ainsi, ces courants sont utilisés pour tremper les pièces d'acier par des courants à haute fréquence, dans les appareils de mesure électriques à induction, dans les compteurs et les relais à courant alternatif (décrits plus bas).

Dans les fours à induction (fig. 114), les courants de Foucault induits par l'enroulement primaire *I* dans l'enroulement secondaire *II* (qui n'est rien d'autre que la masse

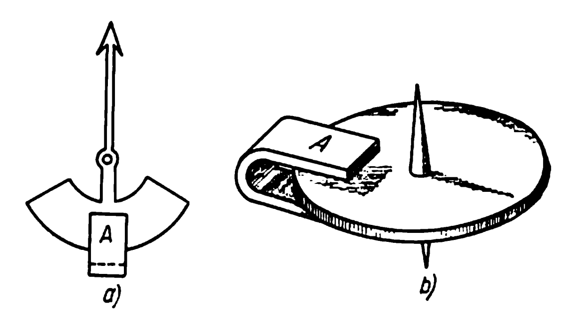


Fig. 115. Frein à induction magnétique

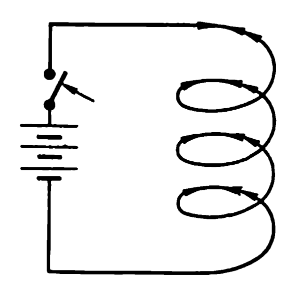
de métal à faire fondre) sont tellement forts et la quantité de chaleur qu'ils dégagent est tellement grande que le métal fond.

Dans les appareils de mesure on monte souvent des freins à induction magnétique (fig. 115). Lorsque l'aiguille oscille (fig. 115, *a*) ou lorsque le disque tourne (fig. 115, *b*), ils coupent le champ de l'aimant *A* et des courants de Foucault y sont induits. D'après la loi de Lenz, le sens de ces courants est tel qu'ils s'opposent à la cause qui les a provoqués. Ainsi, ces courants freinent le mouvement du disque et diminuent les oscillations de l'aiguille, en assurant leur amortissement rapide.

§ 75. F.É.M. D'AUTO-INDUCTION. INDUCTANCE

Quand on ferme l'interrupteur du circuit représenté sur la figure 116, un courant électrique commence à y circuler dont le sens est indiqué par des flèches simples. Le courant produit un champ magnétique dont les lignes d'induction traversent le conducteur et y induisent une F.É.M. Nous avons déjà dit que cette force est appelée F.É.M. d'induction propre ou d'auto-induction. Puisque

toute F.É.M. induite est dirigée, selon la loi de Lenz, contre la cause qui l'a provoquée, et dans le cas considéré cette cause est la batterie de piles, la F.É.M. d'auto-induction est


Fig. 116. La force électromotrice d'auto-induction à l'instant de fermeture du circuit est opposée à la F.É.M. de la source de tension

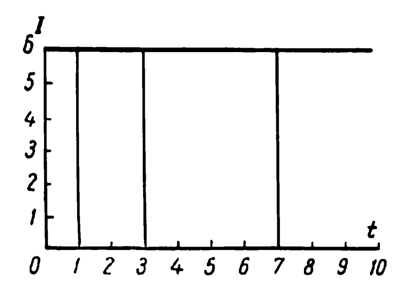


Fig. 117. Graphique d'un courant continu

opposée à la F.É.M. de la batterie. Le sens de la F.É.M. d'auto-induction est indiqué sur la figure 116 par des flèches doubles.

Cela veut dire que le courant ne s'établit pas instantanément dans le circuit. Ce n'est que lorsque le flux magnétique devient stable que le conducteur cesse d'être traversé par les lignes d'induction et la F.É.M. d'auto-induction disparaît. Le circuit est alors parcouru par un courant continu.

La figure 117 représente graphiquement un courant continu. Sur l'abscisse on porte le temps et sur l'ordonnée — le courant. La figure montre que le courant continu est invariable et à tout instant est égal à 6 A.

La figure 118 montre comment s'établit le courant dans un circuit après le branchement. La F.É.M. d'auto-induction est opposée à la F.É.M. de la batterie de piles au moment de branchement et affaiblit le courant dans le circuit. Pour cette raison, au moment de branchement le courant est nul. Ensuite, au premier moment de mesure le courant est égal à 2 A, au second — 4 A, au troisième — 5 A et ce n'est qu'au bout d'un certain temps qu'un courant continu de 6 A s'établit dans le circuit.

Lorsqu'on ouvre le circuit (fig. 119), le courant disparaissant (indiqué par une flèche simple sur le graphique)

fera décroître son champ magnétique. En diminuant depuis une certaine valeur jusqu'à zéro, ce champ coupe de nouveau le conducteur et y induit une F.É.M. d'auto-induction.

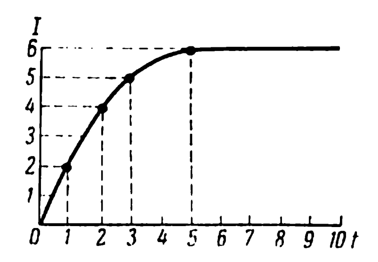


Fig. 118. Courbe d'accroissement du courant dans le circuit en tenant compte de la F.É.M. d'auto-induction

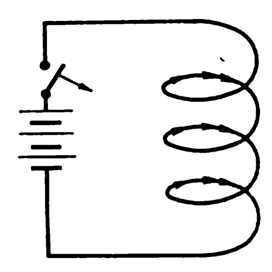


Fig. 119. La F.É.M. d'auto-induction à l'instant d'ouverture du circuit est dirigée dans le même sens que la F.É.M. de la source de tension

En cas de coupure du circuit, la F.É.M. d'auto-induction (indiquée sur la figure 119 par une flèche double) est dirigée dans le même sens que la F.É.M. de la source de tension.

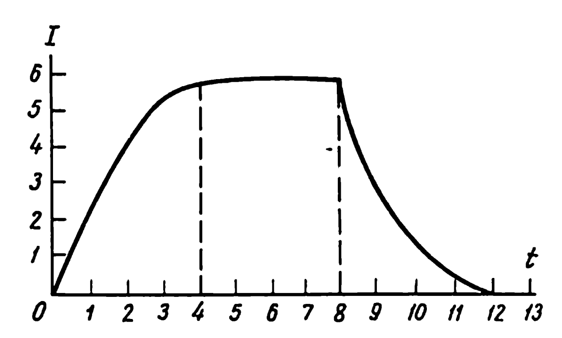


Fig. 120. Courbe d'accroissement et de disparition du courant dans le circuit en tenant compte de la F.É.M. d'auto-induction

Par suite de l'auto-induction, le courant dans le circuit ne disparaît pas instantanément.

Ainsi, la F.É.M. d'auto-induction s'oppose toujours à la cause qui l'a provoquée. En notant cette propriété, on dit que la F.É.M. d'auto-induction est analogue à une réaction.

La figure 120 montre la variation du courant dans le circuit en tenant compte de la F.É.M. d'auto-induction apparaissant lors de la fermeture et de l'ouverture du circuit.

Lorsqu'on ouvre des circuits comprenant un grand nombre de spires et de noyaux d'acier massifs ou, comme on dit, ayant une grande inductance, la F.É.M. d'auto-induction peut avoir une valeur plusieurs fois supérieure à la F.É.M. de la source de tension. A l'instant de l'ouverture, l'intervalle d'air entre la lame mobile et la mâchoire fixe de l'interrupteur est percé et un arc électrique apparaît faisant fondre les parties en cuivre de l'interrupteur et, en l'absence d'enveloppe protectrice sur l'interrupteur, cet arc peut causer une brûlure à la main de l'opérateur (fig. 121).

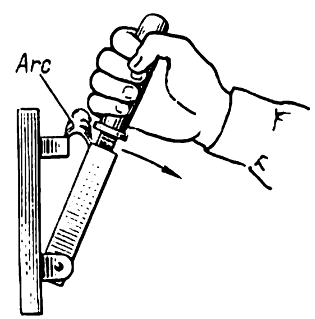


Fig. 121. Courant d'induction lors de l'ouverture d'un circuit

Dans le circuit lui-même la F.É.M. d'auto-induction peut percer l'isolation des spires des bobines, des électro-aimants, etc. Pour prévenir cela, on monte dans certains dispositifs de coupure un contact spécial qui met en court-circuit l'enroulement de l'électro-aimant lors du débranchement.

On ne doit pas oublier que la F.É.M. d'auto-induction se manifeste non seulement aux moments de fermeture et d'ouverture d'un circuit, mais aussi en cas de toute variation du courant.

La grandeur de la F.É.M. d'auto-induction dépend de la vitesse de variation du courant dans le circuit. Par exemple, si dans le même circuit le courant a varié en une seconde de 50 à 40 A (variation de 10 A) dans un cas et de 50 à 20 A (variation de 30 A) dans l'autre cas, la F.É.M. d'auto-induction est trois fois plus grande dans le deuxième cas que dans le premier.

La valeur de la F.É.M. d'auto-induction dépend aussi de l'inductance du circuit. Les enroulements des génératrices, des moteurs électriques, des transformateurs et des bobines dotés de noyaux de fer sont des circuits à grande inductance. Les conducteurs rectilignes possèdent une inductance plus petite. Les conducteurs rectilignes de petite

longueur, les lampes à incandescence et les appareils de chauffage électrique (fours, réchauds) ne possèdent pratiquement pas d'inductance et la F.É.M. d'auto-induction ne se manifeste presque pas.

Un flux magnétique qui traverse un circuit fermé et y induit une F.É.M. d'auto-induction est proportionnel à l'intensité du courant qui parcourt ce circuit:

$$\Phi = LI,$$

où L est un coefficient de proportionnalité. Il est appelé coefficient d'induction propre ou inductance propre ou, enfin, auto-inductance. Déterminons la formule aux dimensions de l'inductance:

$$[L] = \left[\frac{\Phi}{I}\right] = \frac{\mathrm{V \cdot s}}{\mathrm{A}} = \mathrm{ohm \cdot s} = \mathrm{henry\ (H)}.$$

1 henry $= 10^3$ millihenry (mH) $= 10^6$ microhenry (µH).

L'inductance est encore mesurée en centimètres:

$$1 \text{ henry} = 10^9 \text{ cm}.$$

Par exemple, une ligne télégraphique longue de 1 kilomètre a une inductance de 0,002 H. L'inductance des enroulements des grands électro-aimants atteint plusieurs centaines d'henrys.

Si le courant dans un circuit a varié de Δi, le flux magnétique varie de $\Delta\Phi$:

$$\Delta\Phi = L\Delta i.$$

La F.É.M. d'auto-induction qui apparaît alors dans le circuit est

$$e_L = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Si la variation du courant dans le temps est uniforme, le rapport $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ est constant et on peut le remplacer par $\frac{I}{t}$. Alors la valeur absolue de la F.É.M. d'auto-induction dans le circuit peut être calculée par la formule:

$$E_L = L\frac{I}{t}.$$

En partant de cette dernière formule, on peut formuler la définition de l'unité d'inductance, l'henry:

$$1\mathrm{V} = 1\mathrm{H} \cdot \frac{1\mathrm{A}}{1\mathrm{s}}.$$

Un conducteur possède une inductance de 1 H si la variation uniforme à raison de 1 ampère par seconde du courant qui le parcourt produit une F.É.M. de 1 volt.

Comme nous l'avons vu, la F.É.M. d'auto-induction apparaît dans un circuit à courant continu seulement aux instants de fermeture et d'ouverture du circuit et en cas de variation quelconque du courant. Quand l'intensité du

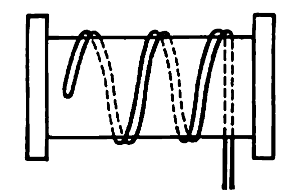


Fig. 122. Bobinage bifilaire

courant dans le circuit est invariable, le flux magnétique du conducteur est constant et la F.É.M. d'auto-induction ne peut pas se produire $\left(\text{puisque } \frac{\Delta i}{\Delta t} = 0\right)$. Aux instants de variation du courant dans le circuit, la F.É.M. d'auto-induction s'oppose aux variations du courant, autrement dit, lui oppose une certaine résistance.

Il arrive souvent qu'on doit confectionner une bobine sans inductance (résistances additionnelles pour appareils de mesure électriques, rhéostats, etc.). Dans ce cas on emploie des bobinages bifilaires (fig. 122).

Il est facile de voir sur la figure que les conducteurs voisins sont parcourus par des courants de sens opposés. Il en résulte que les champs magnétiques des conducteurs voisins se neutralisent. Le flux magnétique total et l inductance de la bobine seront nuls. Pour mieux comprendre la notion d'inductance, prenons un exemple puisé dans la mécanique.

On sait du cours de physique que d'après la deuxième loi de Newton l'accélération acquise par un corps sous l'action d'une force est proportionnelle à cette dernière et inversement proportionnelle à la masse du corps:

$$a = \frac{F}{m}$$

ou

$$F = ma = m\frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

Comparons cette formule à celle de la F.É.M. d'auto-induction, en prenant la valeur absolue de la F.É.M. :

$$e_L = L\frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Si on compare dans ces formules la variation de la vitesse dans le temps $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ à la variation du courant dans le temps $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ et la force mécanique à la force électromotrice d'auto-induction, la masse du corps correspondra à l'inductance du circuit.

Lors d'un mouvement rectiligne uniforme $a = 0$ et pour cette raison $F = 0$, c'est-à-dire que lorsqu'un corps n'est pas soumis à l'action d'une force, son mouvement est rectiligne et uniforme (première loi de Newton).

Dans les circuits à courant continu, la valeur du courant ne varie pas $\left(\frac{\Delta i}{\Delta t} = 0\right)$ et, pour cette raison, $e_L = 0$.

§ 76. INDUCTION MUTUELLE

Au § 70 nous avons dit qu'on appelle induction mutuelle de deux conducteurs l influence du champ magnétique variable d'un conducteur sur l'autre se manifestant par

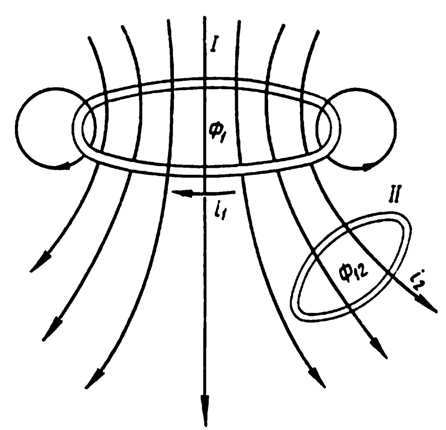


Fig. 123. Phénomène d'induction mutuelle

l'induction d'une F.É.M. dans le second conducteur. Soient *I* et *II* (fig. 123) deux conducteurs ou deux bobines, ou bien deux circuits fermés quelconques. Le courant i_1 dans le

premier conducteur est créé par une source de tension (non représentée sur la figure). Le courant i_1 produit un flux magnétique Φ_1 dont une partie Φ_{12} coupe le second conducteur et l'autre partie Φ_{11} se ferme sans passer par le second conducteur :

$$\Phi_1 = \Phi_{12} + \Phi_{11}.$$

Si, au lieu des conducteurs, on prend deux bobines à nombre de spires w_1 et w_2, le flux à travers le second circuit est :

$$\psi_{12} = w_2\Phi_{12}.$$

Puisque le flux Φ_{12} est proportionnel au courant i_1, la relation entre le flux embrassé ψ_{12} et le courant i_1 est :

$$\psi_{12} = M_{12}i_1,$$

d'où

$$M_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_1} = \frac{w_2\Phi_{12}}{i_1},$$

où M_{12} est un coefficient de proportionnalité appelé coefficient d'induction mutuelle ou inductance mutuelle de deux bobines (ou de deux circuits).

La formule aux dimensions de l'inductance mutuelle est définie comme suit :

$$[M] = \left[\frac{w\Phi}{i}\right] = \frac{\mathrm{V \cdot s}}{\mathrm{A}} = \text{ohm·s ou henry.}$$

L'inductance mutuelle M est donc mesurée par les mêmes unités que l'inductance L.

L'inductance mutuelle dépend du nombre de spires des bobines, de leurs dimensions, de la disposition mutuelle des bobines et de la perméabilité du milieu dans lequel elles sont placées.

Si l'on fait circuler un courant i_2 dans le second conducteur, on peut écrire par analogie :

$$\psi_{21} = w_1\Phi_{21}$$

et

$$\psi_{21} = M_{21}i_2,$$

d'où

$$M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_2} = \frac{w_1\Phi_{21}}{i_2}.$$

En utilisant la loi d'Ohm pour un circuit magnétique, on peut démontrer que

$$\Phi_{12}=\frac{i_1w_1}{R_m} \text{ et } \Phi_{21}=\frac{i_2w_2}{R_m},$$

où R_m est la réluctance du circuit fermé traversé par les flux magnétiques Φ_{12} et Φ_{21}.

En introduisant dans les expressions

$$M_{12}=\frac{\psi_{12}}{i_1} \text{ et } M_{21}=\frac{\psi_{21}}{i_2}$$

les valeurs de ψ_{12}, ψ_{21}, Φ_{12}, Φ_{21}, on obtient:

$$M_{12}=\frac{\psi_{12}}{i_1}=\frac{w_2\Phi_{12}}{i_1}=\frac{w_2i_1w_1}{i_1R_m}=\frac{w_1w_2}{R_m},$$

$$M_{21}=\frac{\psi_{21}}{i_2}=\frac{w_1\Phi_{21}}{i_2}=\frac{w_1i_2w_2}{i_2R_m}=\frac{w_1w_2}{R_m}.$$

Nous constatons ainsi que $M_{12}=M_{21}=M$.

Il en résulte que pour l'inductance mutuelle de deux circuits couplés inductivement ou magnétiquement il est indifférent que le flux magnétique soit créé par le premier ou le second circuit.

Quand le courant i_1 varie, les flux magnétiques Φ_{11} et Φ_{12} varient également dans le second circuit; il y apparaît alors une F.É.M. induite égale à

$$e_{M_2}=-\frac{\Delta\psi_{12}}{\Delta t}=-w_2\frac{\Delta\Phi_{12}}{\Delta t}=-M\frac{\Delta i_1}{\Delta t};$$

et, de façon analogue:

$$e_{M_1}=-\frac{\Delta\psi_{21}}{\Delta t}=-w_1\frac{\Delta\Phi_{21}}{\Delta t}=-M\frac{\Delta i_2}{\Delta t}.$$

Ces F.É.M. sont appelées F.É.M. d'induction mutuelle. Si le premier circuit présente une résistance r_1 et une inductance L_1, la tension U_1 appliquée à ce circuit doit équilibrer la F.É.M. d'auto-induction, la F.É.M. d'induction mutuelle et la chute de tension dans la résistance r_1:

$$U_1=L_1\frac{\Delta i_1}{\Delta t}+M\frac{\Delta i_2}{\Delta t}+i_1r_1.$$

Pour le second circuit on a:

$$U_2=L_2\frac{\Delta i_2}{\Delta t}+M\frac{\Delta i_1}{\Delta t}+i_2r_2.$$

La relation qui lie les inductances L_1 et L_2 des circuits et l'inductance mutuelle M est la suivante:

$$M = \sqrt{L_1 L_2}.$$

Mais, cette formule est valable lorsque tout le flux magnétique créé par le premier circuit embrasse les spires du second circuit. En pratique, M est inférieure à $\sqrt{L_1 L_2}$, c'est-à-dire que l'on a:

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}; \qquad k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}.$$

K est le *coefficient de couplage des bobines* et il est inférieur à l'unité. Ce coefficient serait égal à l'unité au cas où $\Phi_{12} = \Phi_1$ et $\Phi_{21} = \Phi_2$.

On peut faire varier le couplage électromagnétique des deux circuits en les approchant ou en les éloignant l'un de l'autre ou bien en modifiant leur disposition mutuelle.

On emploie des appareils utilisant le principe d'induction mutuelle et servant à la variation de l'inductance du circuit. Ces appareils sont appelés *variomètres*. Un tel appareil comprend deux bobines connectées en série, dont l'une peut tourner à l'intérieur de l'autre.

Disposons les deux bobines de façon que leurs axes soient parallèles et les champs magnétiques des bobines soient dirigés dans le même sens. Dans ce cas:

$$U = i(r_1 + r_2) + L_1\frac{\Delta i}{\Delta t} + L_2\frac{\Delta i}{\Delta t} + 2M\frac{\Delta i}{\Delta t} =$$

$$= i(r_1 + r_2) + \frac{\Delta i}{\Delta t}(L_1 + L_2 + 2M) = ir + L'\frac{\Delta i}{\Delta t},$$

où l'inductance du système:

$$L' = L_1 + L_2 + 2M.$$

Si on tourne la bobine interne de 180°, les flux magnétiques seront opposés l'un à l'autre. Dans ce cas:

$$U = i(r_1 + r_2) + L_1\frac{\Delta i}{\Delta t} + L_2\frac{\Delta i}{\Delta t} - 2M\frac{\Delta i}{\Delta t} = ir + L''\frac{\Delta i}{\Delta t},$$

où

$$L'' = L_1 + L_2 - 2M.$$

En faisant tourner la bobine interne entre la première et la seconde position on peut faire varier l'inductance du système dans les limites de L' à L''.

Les transformateurs largement utilisés dans différentes branches de la technique fonctionnent selon le principe d'induction mutuelle.

Parfois, l'induction mutuelle est indésirable : deux lignes téléphoniques influent l'une sur l'autre et se gênent mutuellement. Les lignes de transport d'énergie parallèles et proches d'une ligne téléphonique y induisent des courants provoquant des bruits et des crépitements gênant les conversations téléphoniques.

§ 77. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN TRANSFORMATEUR

Le transformateur est un appareil transformant le courant alternatif d'une tension en courant alternatif d'une autre tension, mais de même fréquence (fig. 124).

Un transformateur se compose d'un noyau en acier doux sur lequel sont enroulés deux enroulements. L'enroulement

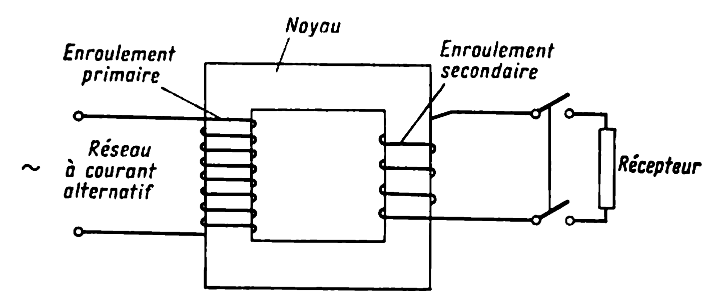


Fig. 124. Schéma d'un transformateur

auquel on applique une tension est appelé primaire. Le courant passant par l'enroulement primaire crée un champ magnétique dont les lignes d'induction se ferment dans le noyau. L'enroulement dans lequel est induite la F.É.M. utilisée dans le circuit extérieur est appelé enroulement secondaire.

Si l'on alimente l'enroulement primaire d'un transformateur en courant continu obtenu à partir de piles, accumulateurs ou génératrices, la F.É.M. induite n'apparaîtra dans l'enroulement secondaire qu'aux moments de variation du courant.

Si l'on alimente l'enroulement primaire du transformateur en courant alternatif dont la valeur et le sens varient avec une fréquence déterminée, dans le circuit secondaire fermé circulera également un courant alternatif et les lampes électriques branchées dans ce circuit seront allumées et ne clignoteront pas. On voit donc que le fonctionnement d'un transformateur repose sur l'induction mutuelle.

§ 78. BOBINE D'INDUCTION

La bobine d'induction ou bobine de Ruhmkorff (fig. 125) représente un cas particulier de transformateur. Elle comprend un noyau *1* (composé de fils d'acier) sur lequel sont enroulées plusieurs spires de gros fil isolé *2*. Ces spires forment l'enroulement primaire de la bobine. Par dessus est

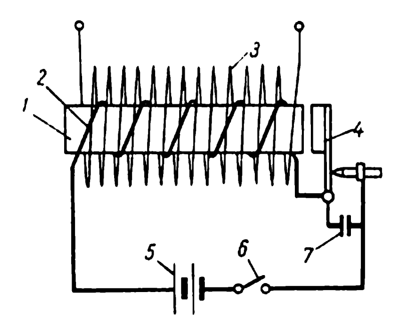


Fig. 125. Schéma d'une bobine d'induction

enroulé un autre enroulement *3* en fil fin isolé à très grand nombre de spires (de 16 000 à 1 000 000 et plus). C'est l'enroulement secondaire. L'enroulement primaire est connecté, par l'intermédiaire d'un rupteur *4*, à une source de tension continue *5* (batterie de piles, batterie d'accumulateurs, etc.).

Lorsqu'on ferme l'interrupteur *6*, le courant de la batterie passe par l'enroulement primaire de la bobine et aimante son noyau. Le noyau attire l'armature du rupteur, en coupant le circuit de l'enroulement primaire. A l'instant suivant, le noyau désaimanté lâche l'armature du rupteur. L'armature revient dans sa position initiale sous l'action d'un ressort, ferme le circuit de l'enroulement primaire et tout le processus se répète.

Grâce aux fermetures et ouvertures consécutives du circuit, l'enroulement primaire de la bobine est parcouru par un courant périodiquement interrompu. Le champ magnétique de l'enroulement primaire varie et en traversant les spires de l'enroulement secondaire y induit une F.É.M. Lors de la fermeture du circuit primaire la F.É.M. induite dans l'enroulement secondaire a un sens déterminé et lors de l'ouverture, elle a un sens contraire. Le grand nombre de spires permet d'obtenir aux extrémités de l'enroulement secondaire une tension de plusieurs milliers de volts et parfois même de quelques centaines de milliers de volts. La couche d'air entre les extrémités de l'enroulement secondaire est percée et est traversée par une étincelle, dont la longueur dans les grandes bobines d'induction peut atteindre 1 mètre.

Pour obtenir une grande F.É.M. dans l'enroulement secondaire il faut que le courant dans le circuit primaire varie aussi rapidement que possible. Mais, l'étincelle qui apparaît dans le rupteur lors de l'ouverture de ses contacts ne permet pas au courant de disparaître instantanément. Pour que l'étincelle disparaisse plus rapidement on branche parallèlement aux bornes de coupure un condensateur *7*.

On peut alimenter l'enroulement primaire de la bobine d'induction en courant alternatif. Le rupteur devient alors inutile.

La bobine d'induction de Ruhmkorff a permis de faire plusieurs découvertes importantes en physique. Les bobines d'induction sont largement utilisées pour allumer le mélange gazeux dans les moteurs à essence.

Problèmes

1. Dans un champ magnétique uniforme, dont l'induction est de 6000 Gs se déplace un conducteur sous un angle de 30° par rapport à la direction du champ. La longueur du conducteur est de 50 cm et sa vitesse de translation est de 2,5 m/s. Calculer la F.É.M. induite.

2. Un flux magnétique de $0{,}6 \cdot 10^6$ Mx qui traverse une bobine comprenant 200 spires diminue jusqu'à zéro en 0,05 s. Calculer la F.É.M. induite dans la bobine.

3. Le courant dans une bobine a varié uniformément de 200 A en 0,01 s. Calculer la F.É.M. d'auto-induction, si l'inductance de la bobine est de 0,05 H.

4. Déterminer l'inductance d'une bobine comprenant 100 spires si une variation uniforme du courant de 20 A provoque une variation du flux magnétique de 0,6 Wb pendant le même temps.

Questions de contrôle

1. Qu'est-ce que l'induction électromagnétique ?
2. Dans quels cas apparaît une F.É.M. induite ?
3. De quoi dépend le sens de la F.É.M. induite ?
4. Comment détermine-t-on le sens de la F.É.M. induite dans un conducteur ?
5. De quoi dépend la valeur de la F.É.M. induite dans un conducteur ?
6. Quel est le principe de fonctionnement d'une génératrice à courant continu ?
7. Comment s'énonce la loi de Lenz et quelles sont les expériences qui la confirment ?
8. Qu'est-ce que l'induction mutuelle ?
9. Quel est le principe de fonctionnement d'un transformateur ?
10. Qu'est-ce qu'une bobine d'induction ?
11. Qu'entend-on par les courants de Foucault et quelles sont les mesures qu'on prend pour les réduire ?
12. Qu'est-ce que l'auto-induction ?
13. Comment se manifeste l'auto-induction dans les circuits à courant continu ?

CHAPITRE VII

COURANT ALTERNATIF MONOPHASÉ

§ 79. PRODUCTION DE COURANT ALTERNATIF

Soit un champ magnétique uniforme créé entre les pôles *NS* d'un électro-aimant (fig. 126, *a*). A l'intérieur du champ, sous l'action d'une force extérieure, un conducteur métallique rectiligne tourne dans le sens horaire. On sait que lorsqu'un conducteur coupe les lignes d'induction une

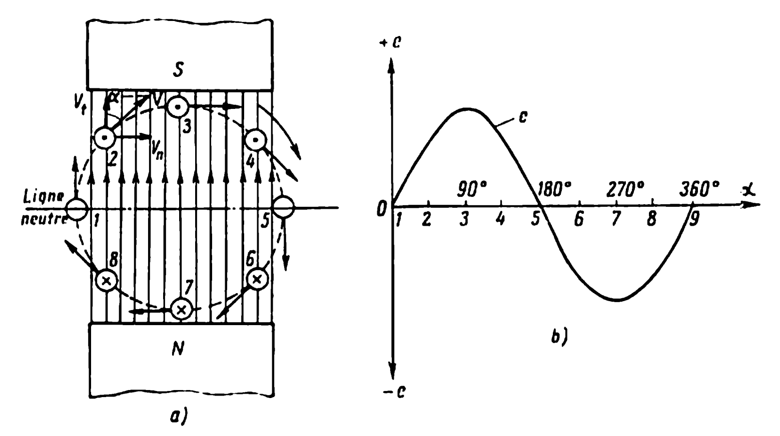


Fig. 126. Production de courant alternatif:
a — rotation d'un conducteur dans un champ magnétique uniforme; *b* — courbe de variation du courant alternatif

F.É.M. est induite dans ce conducteur. La valeur de cette F.É.M. dépend, comme nous l'avons déjà indiqué (§ 71), de la valeur de l'induction magnétique B, de la longueur active l du conducteur, de la vitesse v avec laquelle le conducteur coupe les lignes d'induction et du sinus de l'angle α formé par la direction du mouvement du conducteur et la direction du champ magnétique:

$$e = Blv \sin \alpha.$$

Décomposons la vitesse circulaire v en deux composantes: une composante normale et une composante tangentielle à la direction de l'induction magnétique B, comme il a été indiqué au § 71. La composante normale de la vitesse v_n qui détermine la F.É.M. induite est:

$$v_n = v \sin \alpha.$$

La composante tangentielle de la vitesse v_t ne participe pas à la création de la F.É.M. induite. Elle est:

$$v_t = v \cos \alpha.$$

Pour $\alpha = 90°$ la vitesse normale:

$$v_n = v \sin \alpha = v \sin 90° = v,$$

c'est-à-dire que dans ce cas la composante normale de la vitesse est maximale. Au même instant, la valeur de la F.É.M. induite dans le conducteur est aussi maximale:

$$e = Blv = E_m,$$

d'où l'expression générale donnant la F.É.M. dans le conducteur:

$$e = E_m \sin \alpha.$$

Lors de son mouvement, le conducteur occupe des positions différentes. Sur le dessin, les positions du conducteur sont données tous les 45° de l'angle de rotation. En examinant les différentes positions du conducteur, on voit que l'angle α varie et en plus, lorsque le conducteur passe par la ligne neutre, le sens de la F.É.M. induite, déterminé d'après la règle de la main droite, change. Pour mieux présenter les choses, dressons un tableau donnant la valeur et le sens de la F.É.M. (proportionnelle au $\sin \alpha$) en fonction de la position du conducteur et de l'angle formé par le vecteur d'induction et le vecteur de la vitesse de rotation du conducteur (tableau 16).

L'analyse du tableau montre que pendant un tour complet la F.É.M. induite dans le conducteur croît de zéro jusqu'à une valeur maximale, décroît ensuite jusqu'à zéro et après avoir changé de sens, s'élève à nouveau jusqu'au maximum et décroît ensuite jusqu'à zéro. Lors du mouvement ultérieur du conducteur, les variations de la F.É.M. recommencent.

Pour mieux présenter comment varie la F.É.M. induite dans le conducteur on se servira de la méthode graphique.

Tableau 16

Valeur et sens de la F.É.M. en fonction de la position du conducteur

Position du conducteur	Angle α entre le vecteur d'induction B et celui de la vitesse v	$\sin \alpha$	Sens de la F.É.M. dans le conducteur
1	0	0	—
2	45	0,707	vers nous
3	90	1	» »
4	135	0,707	» »
5	180	0	—
6	225	—0,707	de nous
7	270	—1	» »
8	315	—0,707	» »
9 ou 1	360	0	—

Traçons deux axes perpendiculaires l'un à l'autre (fig. 126, *b*). Portons sur l'abscisse à une échelle les angles de rotation du conducteur et sur l'ordonnée portons à une autre échelle la valeur de la F.É.M. induite dans le conducteur à chaque instant. Si l'on admet que la F.É.M. induite dans le conducteur lors de son passage sous le pôle sud est positive et on la porte sur l'ordonnée vers le haut, la F.É.M. induite dans le conducteur lors de son passage sous le pôle nord doit être considérée comme négative et doit être portée sur l'ordonnée vers le bas à partir de zéro. En traçant ensuite une ligne continue passant par les bouts des tronçons représentant à l'échelle choisie les valeurs de la F.É.M., on obtient une courbe appelée *sinusoïde*. A l'aide de cette courbe on peut facilement déterminer la valeur de la F.É.M. à chaque instant. A cette fin on porte sur l'abscisse la valeur de l'angle de rotation du conducteur à l'instant qui nous intéresse à partir de sa position initiale. Ensuite, on élève une perpendiculaire depuis ce point. Le tronçon compris entre les points d'intersection de la perpendiculaire avec la courbe et l'abscisse représente à l'échelle choisie la valeur de la F.É.M. induite dans le conducteur à cet instant.

Dans l'exemple examiné, le conducteur tournait dans un champ magnétique uniforme et il y était induite une F.É.M. qui variait sinusoïdalement. Une telle F.É.M. est dite *sinusoïdale*.

On verra par la suite qu'en électrotechnique on préfère utiliser des grandeurs sinusoïdales.

Le dispositif montré sur la figure 127 permet de prélever et d'envoyer dans le circuit extérieur une F.É.M. alternative. Un conducteur sous forme d'un cadre tourne dans un champ magnétique sous l'action d'une force extérieure.

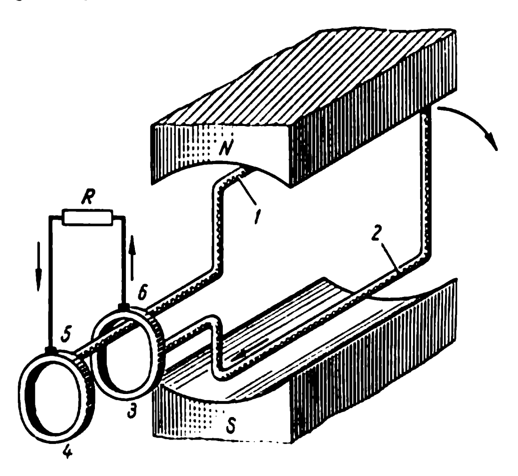


Fig. 127. Dispositif servant à prélever le courant alternatif au rotor de la génératrice

Les extrémités du cadre sont connectées à deux bagues de cuivre *3* et *4* sur lesquelles frottent deux balais de charbon *5* et *6*. Le circuit extérieur est parcouru par un courant de grandeur et sens variables. A la différence du courant continu fourni par les piles et les accumulateurs, un tel courant est appelé courant *alternatif*. Sur les schémas électriques, le courant alternatif est désigné par le signe conventionnel ~.

A la création de la F.É.M. induite participent seulement les côtés du cadre qui coupent les lignes de force d'induction. Ces côtés sont appelés *côtés actifs*. (A la fig. 127, ils sont désignés par les chiffres *1* et *2*.)

La génératrice à courant alternatif dont la construction est schématisée par la fig. 127 ne peut, cependant, être utilisée en pratique. Ses défauts résident dans la difficulté de créer un champ magnétique uniforme et dans la grande réluctance que rencontre le flux magnétique dont une partie considérable de l'itinéraire passe par l'air.

Dans les machines électriques modernes, on place entre les pôles de l'électro-aimant un tambour d'acier dont les encoches renferment les conducteurs de l'enroulement. Une telle génératrice est représentée sur la figure 128. Les lignes d'induction n'ont dans ce cas qu'un chemin très court à faire dans l'air entre le fer des pôles et celui du tambour. On peut démontrer qu'en passant par les entrefers les lignes d'induction entrent perpendiculairement au tambour et en ressortent également perpendiculairement pour atteindre le pôle opposé. Dans ce cas, la vitesse circulaire est à chaque instant perpendiculaire à la direction des lignes de force, c'est-à-dire que la vitesse sera tout le temps une vitesse normale ($v = v_n$).

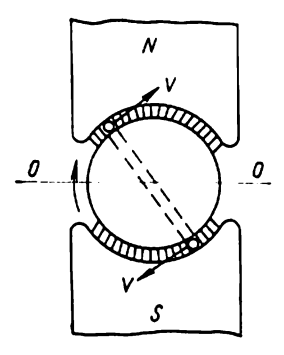


Fig. 128. Flux magnétique d'une machine dotée d'un tambour de fer

Afin d'obtenir une F.É.M. sinusoïdale on donne aux pièces polaires des génératrices une forme spéciale de sorte que l'induction dans l'entrefer varie sinusoïdalement :

$$B = B_m \sin \alpha,$$

où B_m est l'induction maximale dans l'entrefer pour $\alpha = 90°$, c'est-à-dire :

$$B = B_m \sin \alpha = B_m \sin 90° = B_m.$$

A cet instant, la F.É.M. induite dans le conducteur a aussi une valeur maximale :

$$e = B_m lv = E_m,$$

d'où l'expression générale pour la F.É.M. induite dans le conducteur est :

$$e = E_m \sin \alpha.$$

Pour obtenir une F.É.M. induite dans les génératrices il est indifférent que se soit un conducteur mobile qui coupe un champ magnétique fixe ou que se soit un champ mobile qui coupe un conducteur fixe. Dans les génératrices à courant alternatif que nous avons examinées, l'enroulement où était induite la F.É.M. alternative se trouvait sur

la partie mobile de la machine appelée rotor et les pôles étaient disposés sur la partie fixe appelée stator. Mais, pour mettre l'enroulement de courant alternatif dans des conditions plus favorables, on le dispose plus souvent sur le

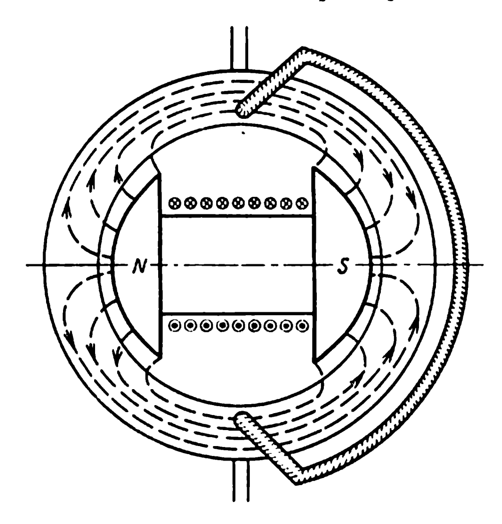


Fig. 129. Génératrice bipolaire à courant alternatif

stator et l'enroulement d'excitation des pôles est disposé sur le rotor. Une génératrice de cette construction est représentée à la figure 129.

Le courant continu nécessaire pour alimenter l'enroulement d'excitation est fourni par une machine excitatrice spéciale à courant continu qui est placée sur le même arbre que la génératrice à courant alternatif ou par un redresseur.

§ 80. PRINCIPALES NOTIONS ET DÉFINITIONS RELATIVES AUX COURANTS ALTERNATIFS

En examinant la production du courant alternatif on constate que la F.É.M. alternative et le courant alternatif changent périodiquement leurs sens et valeur. La valeur d'une grandeur alternative (courant, tension et F.É.M.) à l'instant examiné est appelée *valeur instantanée* et est désignée par une lettre minuscule (i — courant, u — tensino, e — F.É.M.).

La plus grande valeur instantanée d'une grandeur alternative est appelée valeur *maximale* ou *amplitude* et est désignée par une lettre majuscule avec l'indice m, par exemple I_m, E_m, U_m. L'intervalle de temps après lequel les variations de la grandeur alternative (F.É.M., tension ou courant) se répètent est appelé *période* et est désigné par la lettre T. La période est mesurée en secondes. Le nombre de périodes par seconde est appelé *fréquence* du courant alternatif et est désigné par la lettre f. On utilise comme unité de fréquence le hertz (Hz). Le hertz est égal à une période par seconde.

Dans l'industrie on emploie des courants alternatifs de différentes fréquences. La fréquence adoptée en U.R.S.S. est de 50 Hz. Pour les fours électriques de haute fréquence on utilise des courants alternatifs à la fréquence de plusieurs milliers ou de dizaines de milliers de Hz (1 000, 2 500 et 8 000 Hz fournis par des générateurs tournants et 150 à 250 kHz fournis par des générateurs à tubes). Pour l'échauffement diélectrique des matières plastiques, du bois, du verre, des produits alimentaires et des matériaux semi-conducteurs ou diélectriques on emploie des installations fournissant des fréquences de 20 à 25 MHz.

Les lignes de transmission téléphoniques utilisent des courants ayant la fréquence de plusieurs centaines et milliers de hertz. En radiotechnique, on utilise des courants à fréquence de plusieurs millions et milliards de hertz.

La fréquence des courants alternatifs est mesurée à l'aide d'appareils, appelés fréquencemètres.

La période et la fréquence sont liées par la relation suivante:

$$T=\frac{1}{f}; \quad f=\frac{1}{T}.$$

Exemple 1. Calculer la période d'un courant dont la fréquence est de 50 Hz.

$$T=\frac{1}{f}=\frac{1}{50}=0{,}02 \text{ s.}$$

Exemple 2. Calculer la fréquence d'un courant dont la période est de $5\cdot10^{-8}$ s.

$$f=\frac{1}{T}=\frac{1}{5\cdot10^{-8}}=20\cdot10^{6}\text{ Hz}=20\cdot10^{3}\text{ kHz (kilohertz)}=$$

$$=20 \text{ MHz (mégahertz).}$$

§ 81. GRANDEURS ALTERNATIVES SINUSOÏDALES

En technique on utilise généralement les oscillations sinusoïdales des grandeurs électriques alternatives. Par la suite, en parlant du courant, de la F.É.M., de la tension et du flux magnétique, nous admettrons qu'ils varient sinusoïdalement.

Soit un vecteur OA (fig. 130) représentant à l'échelle choisie une grandeur alternative sinusoïdale, par exemple, un courant. Faisons tourner ce vecteur autour d'un point O

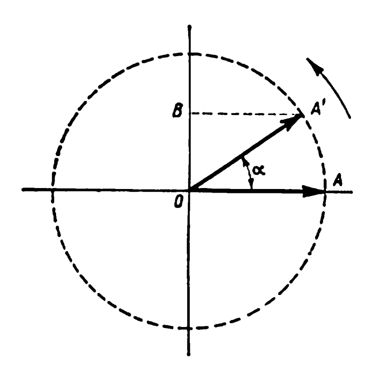


Fig. 130. Rotation du vecteur autour d'un axe

dans le sens antihoraire à une vitesse constante. L'extrémité du vecteur décrit alors un cercle et l'angle de rotation du vecteur change avec le temps.

La *vitesse angulaire* ou la *pulsation* ω est égale à l'angle de rotation du vecteur par unité de temps:

$$\omega = \frac{\alpha}{t},$$

d'où

$$\alpha = \omega t.$$

Souvent, au lieu du degré, on utilise une autre unité de mesure des angles, le *radian*. Le radian est un angle dont l'arc est égal au rayon. Puisque la circonférence est $C = 2\pi R$, elle contient $\frac{2\pi R}{R} = 2\pi$ radians.

Soit la durée d'un tour complet du rayon vecteur OA égale à T secondes (période de rotation).

La pulsation angulaire dans ce cas est:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} \frac{\text{rad}}{\text{s}}.$$

Puisque $\frac{1}{T} = f$, on a:

$$\omega = 2\pi f \frac{\text{rad}}{\text{s}}.$$

L'angle de rotation α du rayon vecteur à partir de sa position initiale est:

$$\alpha = \omega t = 2\pi f t.$$

L'angle α est appelé *angle de phase* ou simplement *phase*.

La projection du vecteur OA sur le diamètre vertical est égale au produit de la valeur du vecteur par le sinus de l'angle de phase:

$$OB = OA \sin \alpha.$$

Ainsi, la projection du vecteur tournant OA sur le diamètre vertical varie sinusoïdalement. Si la longueur du vecteur est A_m, la valeur instantanée de la projection a sera:

$$a = A_m \sin \alpha = A_m \sin \omega t;$$

pour $\alpha = 0°$, la valeur $a = A_m \sin 0° = 0$;
pour $\alpha = 90°$, la valeur $a = A_m \sin 90° = A_m$.

Dans le dernier cas, la valeur instantanée de la projection est égale à sa valeur maximale.

En adoptant une phase déterminée et en projetant le vecteur A_m sur le diamètre vertical, on obtient la valeur instantanée de la grandeur sinusoïdale.

Traçons un axe horizontal sur lequel on marquera les phases parcourues par le vecteur pendant sa rotation (fig. 131). Portons ensuite sur le diagramme les tronçons verticaux correspondant aux valeurs instantanées de la grandeur sinusoïdale aux endroits où se terminent les tronçons horizontaux correspondant aux différentes phases. En joignant les extrémités des tronçons verticaux par une courbe, on obtient une sinusoïde.

La courbe sinusoïdale a été obtenue par rotation d'un vecteur dont la longueur représentait à l'échelle adoptée la valeur maximale de la grandeur sinusoïdale alternative. La représentation des grandeurs sinusoïdales à l'aide de

vecteurs de longueur déterminée et disposés de façon déterminée est appelée *diagramme vectoriel.*

La même relation peut être représentée graphiquement sous forme de courbes sinusoïdales.

Une grandeur alternative sinusoïdale peut donc être représentée sous trois formes différentes: d'une équation, d'un diagramme vectoriel et d'une courbe.

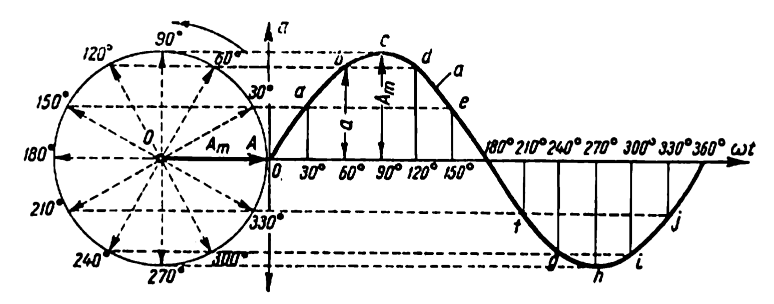


Fig. 131. Sinusoïde obtenue par rotation d'un vecteur

Si à l'instant initial ($t = 0$) le rayon vecteur forme un certain angle ψ avec l'axe horizontal, la valeur instantanée de la grandeur alternative sera:

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi).$$

L'angle ψ est appelé *angle de phase* initiale ou *phase initiale.*

Le diagramme vectoriel et la courbe correspondante sont donnés sur la figure 132.

Maintenant, faisons tourner dans le même sens deux vecteurs ayant le même point initial *O*. Il est possible qu'à un moment donné ces deux vecteurs aient le même angle de phase. Dans ce cas, on dit que ces vecteurs, tout comme les grandeurs alternatives qu'ils représentent, sont en phase. Le diagramme vectoriel et les courbes de deux grandeurs en phase sont donnés sur la figure 133.

Les équations de ces grandeurs s'écrivent comme suit:

$$a_1 = A_{1m} \sin \omega t,$$

$$a_2 = A_{2m} \sin \omega t.$$

Si on déplace les vecteurs, l'un par rapport à l'autre, d'un certain angle φ en les faisant tourner autour du point *O*,

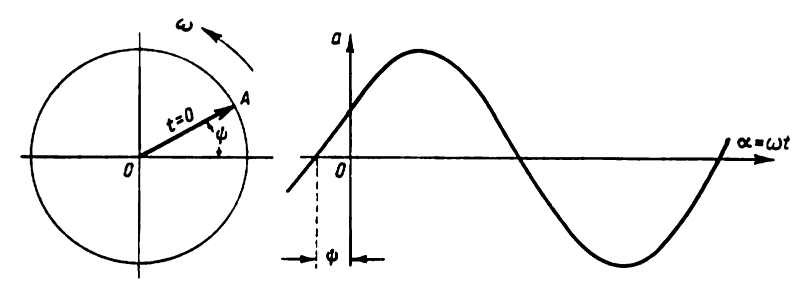


Fig. 132. Construction d'une sinusoïde en partant d'une phase initiale

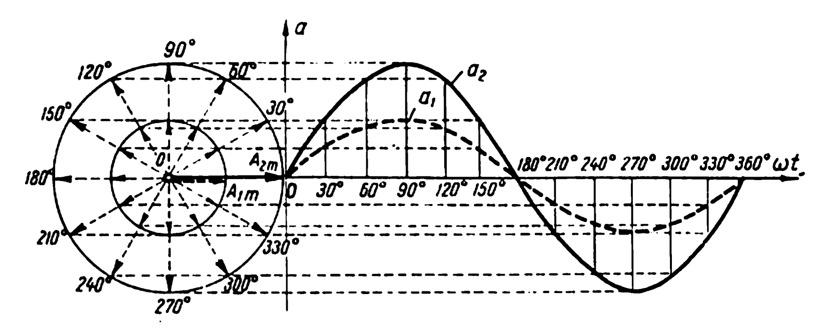


Fig. 133. Construction de deux sinusoïdes par rotation de deux vecteurs concordants

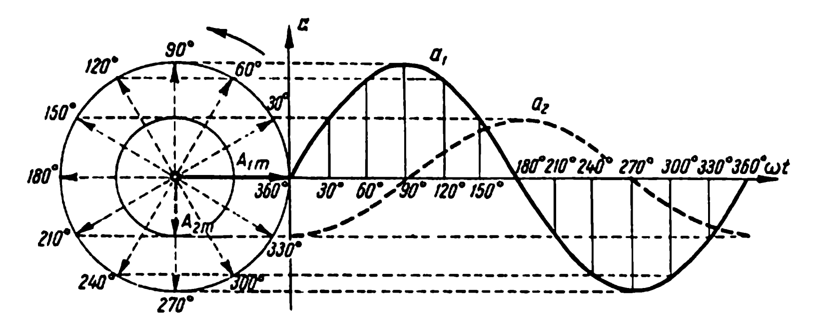


Fig. 134. Construction de deux sinusoïdes décalées de 90° par rotation de deux vecteurs décalés de 90°

on obtient deux courbes sinusoïdales déphasées l'une par rapport à l'autre du même angle φ. La figure 134 montre deux sinusoïdes déphasées d'un angle φ de 90°. Dans ce cas, on dit que la courbe a_1 est en avance de phase de 90° par rapport à la courbe a_2 ou, inversement, la courbe a_2 est en retard de 90° sur la courbe a_1.

Lors de l'étude des phénomènes qui se manifestent dans les circuits à courant alternatif nous serons souvent obligés d'additionner ou de soustraire différentes grandeurs sinusoïdales (courants, tensions, etc.).

Voyons comment faut-il additionner deux grandeurs sinusoïdales données par les équations:

$$a_1 = A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1);$$
$$a_2 = A_{2m} \sin(\omega t + \psi_2).$$

Leur somme donne:

$$a = a_1 + a_2 = A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + A_{2m} \sin(\omega t + \psi_2).$$

Après les transformations mathématiques nécessaires, on obtient définitivement:

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi).$$

On voit que la somme de deux sinusoïdes de même période est une sinusoïde d'amplitude A_m et de phase initiale ψ.

Il est plus simple de représenter l'addition des grandeurs sinusoïdales par un diagramme vectoriel. Il résulte du diagramme (fig. 135, à gauche) que:

$$a_1 = A_{1m} \cos \psi_1;$$
$$a_2 = A_{2m} \cos \psi_2;$$
$$a = a_1 + a_2;$$
$$b_1 = A_{1m} \cdot \sin \psi_1;$$
$$b_2 = A_{2m} \cdot \sin \psi_2;$$
$$b = b_1 + b_2.$$

La valeur du vecteur résultant A_m, égale à la somme géométrique des vecteurs A_{1m} et A_{2m}, est:

$$A = \sqrt{a^2 + b^2};$$
$$\operatorname{tg} \psi = \frac{b}{a}.$$

La figure 135 (à droite) montre l'addition graphique de deux grandeurs sinusoïdales. La valeur instantanée de la

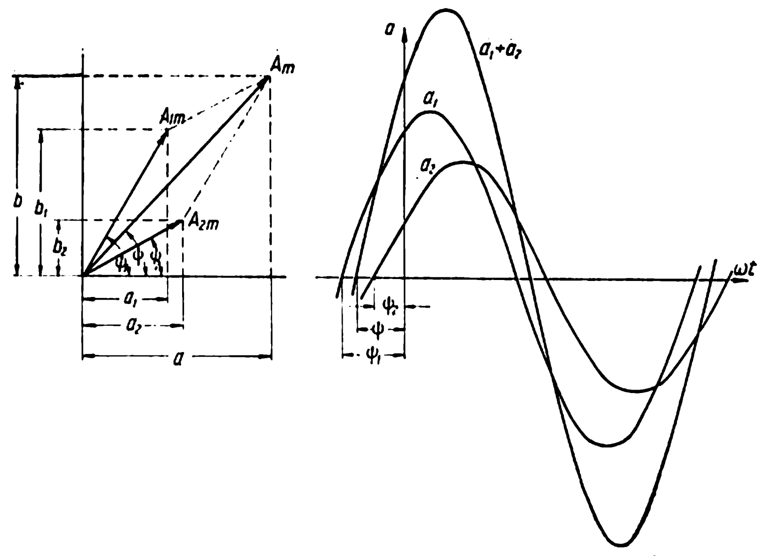


Fig. 135. Addition de deux grandeurs sinusoïdales

sinusoïde résultante est égale à chaque instant à la somme des valeurs instantanées des sinusoïdes additionnées.

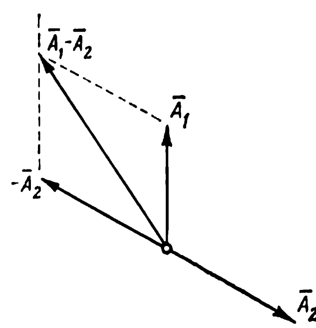


Fig. 136. Soustraction des vecteurs

Les déductions faites sont valables pour l'addition de trois ou d'un plus grand nombre de grandeurs sinusoïdales.

Pour distinguer dans le texte et les formules les vecteurs des grandeurs scalaires, on mettra un trait au-dessus des vecteurs. On écrira, par exemple, la somme de deux vecteurs A_1 et A_2 comme suit :

$$\overline{A} = \overline{A}_1 + \overline{A}_2.$$

Voyons maintenant comment faut-il soustraire des grandeurs vectorielles. Soient deux vecteurs A_1 et A_2 représentant des grandeurs sinusoïdales. Il faut soustraire le vecteur A_2 du vecteur A_1 (fig. 136).

La soustraction des vecteurs peut toujours être remplacée par l'addition du vecteur à diminuer et d'un vecteur égal en grandeur, mais de sens opposé au vecteur à soustraire, c'est-à-dire :

$$\bar{A}_1 - \bar{A}_2 = \bar{A}_1 + (-\bar{A}_2).$$

§ 82. RELATION ENTRE LA FRÉQUENCE D'UNE GÉNÉRATRICE À COURANT ALTERNATIF, LE NOMBRE DE PAIRES DE PÔLES ET LA VITESSE DE ROTATION DU ROTOR

Lorsqu'on examine le problème de production d'un courant alternatif on indique que pendant un tour complet du rotor la F.É.M. induite dans les conducteurs de l'enroulement de la génératrice a une seule période. Quand le rotor de la machine génératrice fait, par exemple, 5 tr/s, la F.É.M. a 5 périodes/s ou la fréquence du courant produit est de 5 Hz. Il en résulte que le nombre de tours par seconde du rotor d'une génératrice est numériquement égal à la fréquence du courant.

La fréquence du courant f est donnée par la formule suivante :

$$f = \frac{n}{60},$$

où n est le nombre de tours du rotor par minute.

Pour qu'une génératrice fournisse un courant à la fréquence standard de 50 Hz, son rotor doit faire 3000 tr/mn :

$$f = \frac{n}{60} = \frac{3000}{60} = 50 \text{ Hz}.$$

Mais ce raisonnement n'est valable que pour une génératrice bipolaire, c'est-à-dire pour une machine comportant une seule paire de pôles.

Si la machine est tétrapolaire, c'est-à-dire que le nombre de paires de pôles est égal à 2 : $p = 2$ (fig. 137), la période complète des variations du courant aura lieu pendant un demi-tour du rotor (positions *1-5* du conducteur sur le dessin). Pendant le second demi-tour du rotor, le courant aura encore une période. Pendant un tour complet du rotor d'une machine tétrapolaire, le courant dans le conducteur a donc

deux périodes. Dans une machine hexapolaire ($p = 3$), le courant dans le conducteur pendant un tour complet du rotor aura trois périodes.

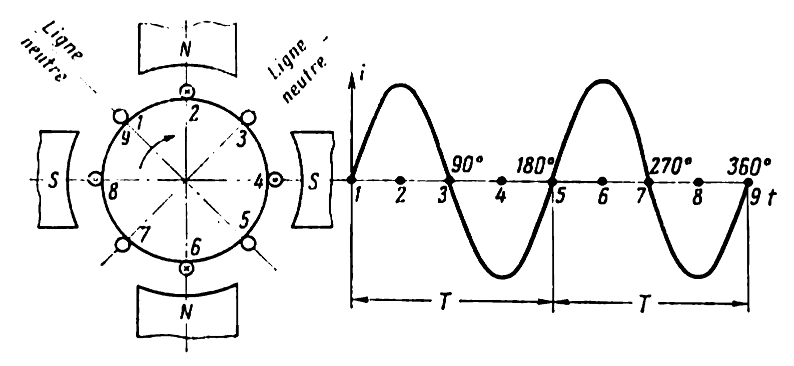


Fig. 137. Variation du courant alternatif dans le conducteur du rotor d'une génératrice tétrapolaire

De cette façon, pour les machines comportant p paires de pôles la fréquence du courant pour $\frac{n}{60}$ tr/s sera p fois plus grande que celle d'une machine bipolaire:

$$f = \frac{pn}{60}.$$

D'où on obtient la formule donnant la vitesse de rotation du rotor:

$$n = \frac{60f}{p}.$$

Exemple 3. Déterminer la fréquence du courant alternatif fourni par une génératrice à huit pôles ($p = 4$) dont la vitesse du rotor $n = 750$ tr/mn. En introduisant les valeurs de p et de n dans la formule donnant la fréquence du courant, on obtient:

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{4 \cdot 750}{60} = 50 \text{ Hz}.$$

Exemple 4. Calculer la vitesse de rotation d'une génératrice à 20 pôles ($p = 10$) si le fréquencemètre indique une fréquence $f =$ $= 25$ Hz. En introduisant les valeurs de p et f dans la formule donnant le nombre de tours du rotor n, on obtient:

$$n = \frac{f\,60}{p} = \frac{25 \cdot 60}{10} = 150 \text{ tr/mn}.$$

Exemple 5. Le rotor d'une génératrice entraînée par une turbine hydraulique fait 75 tr/mn. Calculer le nombre de pôles de la génératrice si la fréquence du courant est 50 Hz:

$$p=\frac{f\,60}{n}=\frac{50\cdot 60}{75}=40 \text{ paires.}$$

La génératrice comporte donc 80 pôles.

§ 83. VALEUR EFFICACE D'UN COURANT ALTERNATIF

Le courant alternatif sinusoïdal présente pendant une période des valeurs instantanées différentes. Une question se pose donc: quelle valeur du courant est mesurée par un ampèremètre inséré dans le circuit? Les actions d'un courant ne sont pas déterminées par des valeurs maximales ou des valeurs instantanées. Pour évaluer l'action d'un courant alternatif nous comparons son action à l'effet thermique d'un courant continu.

La puissance P d'un courant continu I passant par une résistance r sera:

$$P=I^2r.$$

La puissance d'un courant alternatif s'exprime comme l'effet moyen d'une puissance instantanée i^2r pendant une période entière ou comme la valeur moyenne de $(I_m\cdot\sin\omega t)^2\cdot r$ pendant le même temps.

Soit M la valeur moyenne de i^2 pendant une période. En égalisant la puissance d'un courant continu et celle d'un courant alternatif, on a:

$$I^2r=Mr,$$

d'où

$$I=\sqrt{M}.$$

La valeur I est appelée valeur efficace du courant alternatif.

On détermine la valeur moyenne de i^2 du courant alternatif de façon suivante. Construisons une courbe sinusoïdale de variation du courant (fig. 138). En élevant au carré chaque valeur instantanée du courant, on obtient une courbe de i^2 en fonction du temps. Les deux moitiés de cette courbe se trouvent au-dessus de l'abscisse parce qu'étant élevées au carré, les valeurs négatives du courant ($-i$) durant la seconde moitié de la période donnent des valeurs positives.

Construisons sur le graphique un rectangle de base T dont l'aire est égale à l'aire limitée par la courbe de i^2 et l'abscisse. La hauteur M du rectangle correspond à la valeur moyenne

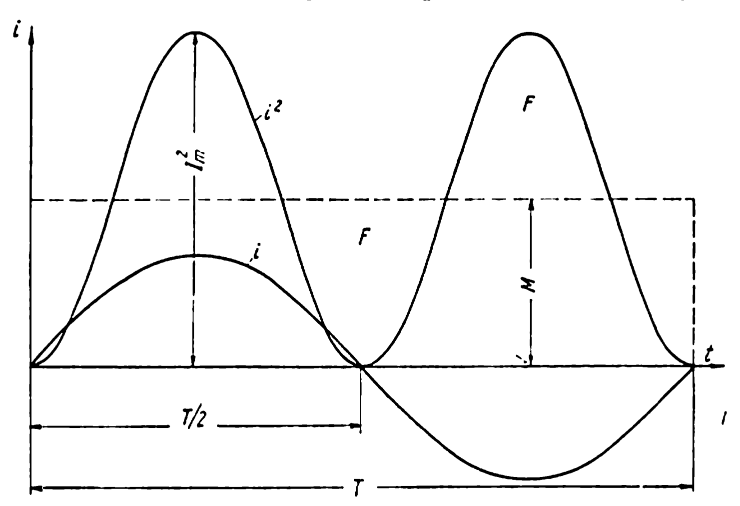


Fig. 138. Valeur efficace d'un courant alternatif

de i^2 durant la période. Calculée à l'aide de mathématiques supérieures cette valeur pour la période T est égale à $\frac{1}{2} I_m^2$.

On a donc:

$$M = \frac{1}{2} I_m^2.$$

Puisque la valeur efficace I de l'intensité du courant alternatif est $\sqrt{M}$, on a définitivement:

$$I = \sqrt{M} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Par analogie, la relation entre la valeur efficace et la valeur maximale de U et E se présente sous la forme suivante:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Les valeurs efficaces des grandeurs alternatives sont désignées par des lettres majuscules sans indice (I, U, E).

En partant de ce que nous venons d'exposer, on peut affirmer que la valeur efficace de l'intensité d'un courant alternatif est égale à l'intensité d'un courant continu qui, en passant par la même résistance que le courant alternatif, dégage pendant le même temps la même quantité d'énergie.

Les appareils de mesure électriques (ampèremètres, voltmètres) insérés dans un circuit à courant alternatif indiquent les valeurs efficaces du courant ou de la tension.

Lors de la construction des diagrammes vectoriels, il est plus commode de porter les valeurs efficaces et non pas les valeurs maximales (amplitudes) des vecteurs. A cette fin on diminue les longueurs des vecteurs de $\sqrt{2}$ fois. Cette opération ne change pas la disposition des vecteurs sur le diagramme.

§ 84. VALEUR MOYENNE D'UN COURANT ALTERNATIF

La valeur moyenne d'une grandeur alternative sinusoïdale durant une période entière est nulle. Pour cette raison, il faut comprendre par valeur moyenne d'une grandeur sinusoïdale la valeur moyenne durant une demi-période. La figure 139 montre une courbe représentant

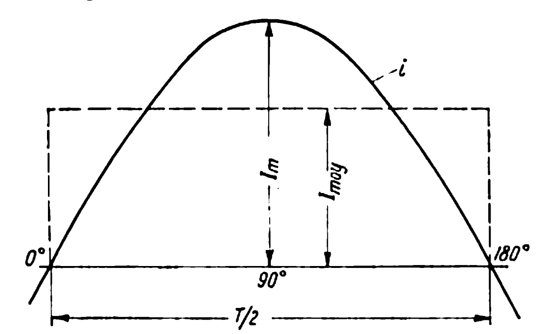


Fig. 139. Valeur moyenne d'un courant alternatif

la variation d'un courant alternatif pendant une demi-période.

Construisons un rectangle dont la base est de $T/2$ et l'aire est égale à l'aire comprise entre la courbe et l'abscisse. La hauteur du rectangle représente la valeur moyenne du courant pendant une demi-période.

Le calcul intégral fournit la relation suivante entre la valeur moyenne et la valeur maximale d'un courant alternatif sinusoïdal:

$$I_{moy} = \frac{2}{\pi} I_m = 0{,}637 I_m.$$

La même relation existe entre les valeurs moyennes et maximales de la tension et de la F.É.M.

$$U_{moy} = 0{,}637 U_m; \quad E_{moy} = 0{,}637 E_m.$$

Le rapport de la valeur efficace d'une grandeur alternative à la valeur moyenne de cette grandeur est appelé *facteur de forme de la courbe* et est désigné par la lettre k_f.

Pour les grandeurs sinusoïdales ce facteur est:

$$k_f = \frac{I}{I_{moy}} = \frac{I_m \pi}{\sqrt{2} \cdot 2 I_m} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1{,}11.$$

Le rapport de la valeur maximale (amplitude) d'une grandeur alternative à sa valeur efficace est appelé *facteur d'amplitude* et est désigné par la lettre k_a.

Pour les grandeurs sinusoïdales ce facteur est:

$$k_a = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2} = 1{,}41.$$

§ 85. CIRCUIT PUREMENT RÉSISTANT

Considérons un circuit (fig. 140) comportant une résistance r. Pour simplifier le problème, nous négligerons l'influence de l'inductance et de la capacité.

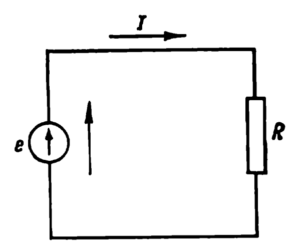


Fig. 140. Circuit purement résistant

Aux bornes du circuit est appliquée une tension sinusoïdale:

$$u = U_m \sin \omega t.$$

D'après la loi d'Ohm, la valeur instantanée du courant est :

$$i = \frac{u}{r} = \frac{U_m}{r} \sin \omega t = I_m \sin \omega t,$$

où $I_m = \frac{U_m}{r}$ ou, en passant aux valeurs efficaces, on obtient :

$$\frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}\, r}$$

et

$$I = \frac{U}{r}.$$

Cette dernière expression montre que la loi d'Ohm pour un circuit purement résistant traversé par un courant alternatif est la même que pour un circuit à courant continu. La loi d'Ohm indique également la proportionnalité existant entre la valeur instantanée de la tension et la valeur

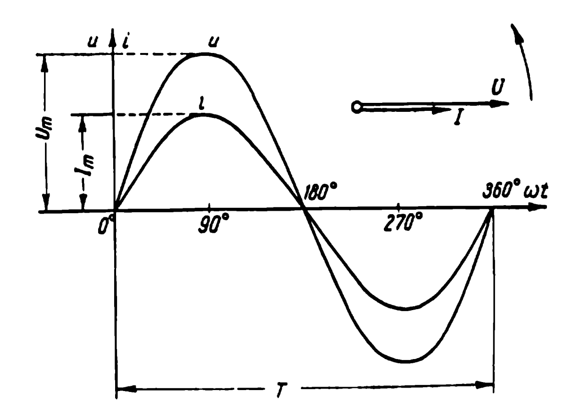


Fig. 141. Courbes et diagramme vectoriel d'un circuit à courant alternatif constitué par une résistance pure

instantanée du courant. Il en découle que dans un circuit à courant alternatif comportant une résistance r, la tension et le courant sont en phase. La figure 141 représente les courbes de tension et de courant, ainsi que le diagramme vectoriel pour le circuit considéré, où les longueurs des vecteurs désignent les valeurs efficaces de la tension et du courant. La résistance des conducteurs en courant alternatif est un peu supérieure à leur résistance en courant continu. L'explication de ce fait est donnée par l'effet de peau décrit au § 87. Pour cette raison la résistance des conducteurs

en courant alternatif est appelée résistance *effective*. Elle est également désignée par la lettre r.

Dans le circuit représenté sur la figure 140 la tension extérieure appliquée est équilibrée par la chute de tension

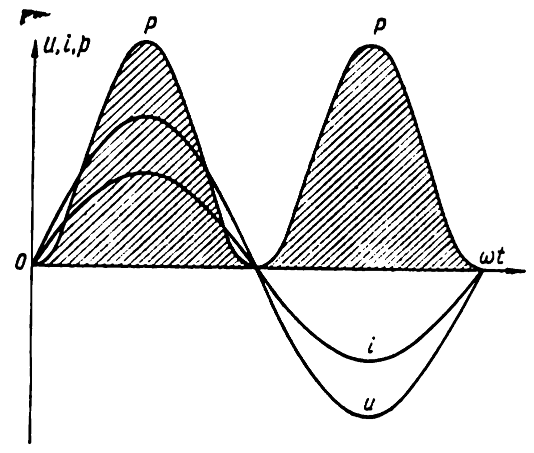


Fig. 142. Courbe de la puissance instantanée d'un circuit purement résistant

dans la résistance r. C'est la *chute de tension active*, qui est désignée par U_a :

$$U_a = Ir.$$

La valeur instantanée de la puissance dans le circuit considéré est égale au produit des valeurs instantanées de la tension et de l'intensité du courant :

$$p = ui.$$

La figure 142 montre la courbe représentant la puissance instantanée pendant une période. On voit d'après cette courbe que la puissance n'a pas une valeur constante, mais présente des ondulations [1] à fréquence double.

La valeur moyenne de la puissance pendant une période ou simplement la puissance moyenne est désignée par la lettre P et peut être déterminée d'après la formule :

$$P = UI \cos \varphi,$$

où φ est l'angle de déphasage entre la tension et le courant.

---

[1]) On appelle ondulation une variation de la valeur numérique d'une grandeur dont le signe reste constant.

La puissance moyenne est aussi appelée puissance active. Cette formule de la puissance active est valable pour n'importe quel circuit à courant alternatif.

Dans un circuit purement résistant la tension et le courant sont en phase. L'angle φ est donc nul et $\cos \varphi = 1$. Pour la puissance active on a:

$$P = UI$$

ou

$$P = I^2 r.$$

Ainsi, la formule de la puissance pour un circuit à courant alternatif purement résistant est la même que celle de la puissance pour un circuit à courant continu. Tous les conducteurs possèdent une résistance ohmique. Dans un circuit à courant alternatif seuls les filaments des lampes à incandescence, les spirales des appareils de chauffage et des rhéostats, les lampes à arc, les enroulements bifilaires spéciaux et les conducteurs rectilignes de petite longueur présentent pratiquement une résistance purement ohmique.

§ 86. CIRCUIT PUREMENT INDUCTIF

Nous avons déjà vu qu'en cas de fermeture ou d'ouverture d'un circuit et, généralement, en cas de toute variation du courant, quand le conducteur est traversé par son propre champ magnétique, il y a apparition, dans ce conducteur, d'une F.É.M. induite que nous avons appelée F.É.M. d'auto-induction. La F.É.M. d'auto-induction présente un effet de réaction. Ainsi, quand le courant dans le circuit croît, la F.É.M. d'auto-induction s'oppose à la F.É.M. fournie par la source de tension et, pour cette raison, le courant ne peut pas s'établir instantanément. Inversement, quand le courant dans le circuit décroît, la F.É.M. d'auto-induction a un sens tel qu'en empêchant le courant de disparaître, elle tend à le maintenir.

Nous savons que la F.É.M. d'auto-induction dépend de la vitesse de variation du courant dans le circuit et de l'inductance de ce circuit (du nombre des spires, de la présence de noyaux de fer).

$$e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Dans un circuit à courant alternatif, la F.É.M. d'auto-induction apparaît d'une façon continue, car le courant dans le circuit varie en permanence.

La figure 143 représente un circuit à courant alternatif comprenant une bobine d'inductance L sans noyau de fer. Pour simplifier le problème, admettons d'abord que la

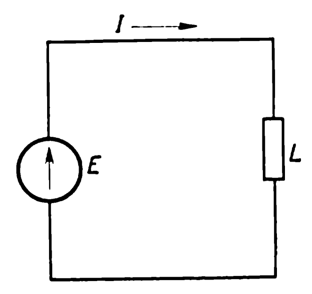


Fig. 143. Circuit à courant alternatif purement inductif

résistance ohmique de la bobine est très faible et on peut la négliger.

Examinons de plus près la variation du courant alternatif pendant une période. La figure 144 montre la courbe représentant la variation du courant alternatif. La première moitié de la période est divisée en petites parties égales.

Pendant l'intervalle de temps *0-1*, la valeur du courant varie entre *0* et *1-1'*. L'accroissement de la valeur du courant pendant ce temps est égal à a.

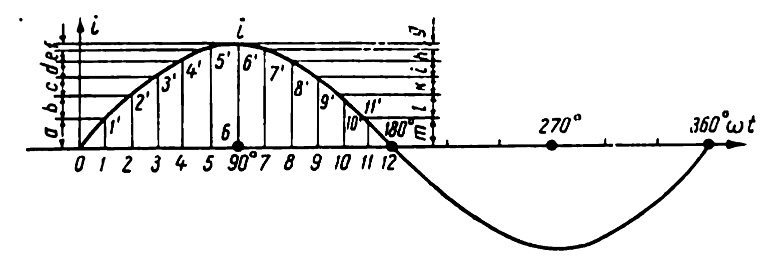


Fig. 144. Détermination de la vitesse de variation d'un courant alternatif

Pendant l'intervalle de temps suivant (*1-2*), la valeur instantanée du courant s'est élevée jusqu'à *2-2'* et l'accroissement de la valeur du courant est égal à b.

Pendant l'intervalle de temps *2-3*, le courant a augmenté jusqu'à *3-3'* et l'accroissement de la valeur du courant est égal à *c*, etc.

Ainsi, avec le temps, le courant alternatif croît jusqu'à une valeur maximale (à 90°). Puis, comme on le voit sur la figure, l'accroissement de la valeur du courant diminue

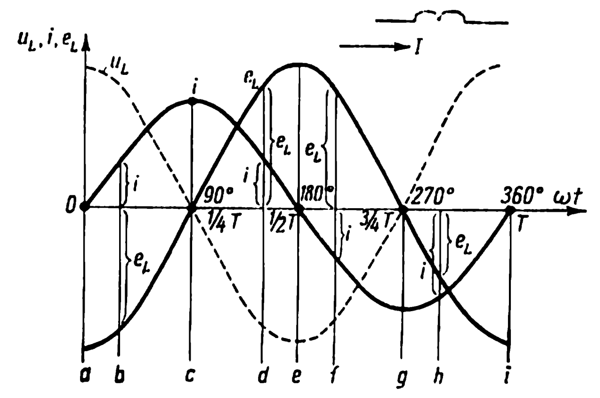


Fig. 145. F.É.M. d'auto-induction dans une bobine branchée dans un circuit à courant alternatif

de plus en plus et, enfin, devient nul pour la valeur maximale du courant.

Après avoir atteint sa valeur maximale, le courant décroît jusqu'à zéro, en augmentant sa vitesse de décroissance. Cette vitesse devient maximale au moment où le courant disparaît; mais il apparaît aussitôt, cette fois étant dirigé en sens inverse.

L'étude de la variation du courant pendant une période entière montre qu'il varie à vitesse maximale près des valeurs nulles. Près des valeurs maximales, la vitesse de variation du courant diminue et devient nulle pour la valeur maximale du courant. Ainsi, le courant alternatif varie non seulement en grandeur et en sens, mais aussi en vitesse de variation. En passant par les spires d'une bobine le courant alternatif crée un champ magnétique alternatif. En coupant les spires de leur propre bobine les lignes d'induction de ce champ y induisent une F.É.M. d'auto-induction.

La courbe *i* de la figure 145 indique la variation du courant alternatif dans la bobine. Comme il a déjà été remar-

qué, la valeur de la F.É.M. d'auto-induction dépend de la vitesse de variation du courant, ainsi que de l'inductance de la bobine. Mais puisque dans le cas considéré, l'inductance de la bobine reste inchangée, la F.É.M. d'auto-induction ne dépendra que de la vitesse de variation du courant. Etant donné que la vitesse de variation du courant est maximale au voisinage de ses valeurs nulles, la F.É.M. d'auto-induction atteint son maximum aux mêmes instants.

A l'instant *a*, le courant augmente rapidement et d'une manière brusque à partir de zéro et, pour cette raison, comme il résulte de la formule indiquée plus haut, la F.É.M. d'auto-induction (courbe e_L) a une valeur maximale négative. Puisque le courant croît, la F.É,M. d'auto-induction doit, d'après la loi de Lenz, s'opposer à la variation (à l'accroissement) du courant. Ainsi, lors de l'accroissement du courant la F.É.M. d'auto-induction a un sens opposé à celui du courant (position *b*), ce qui découle également de la formule indiquée. La vitesse de variation du courant diminue au fur et à mesure qu'il s'approche de sa valeur maximale, la F.E.M. d'auto-induction diminue également et, enfin, devient nulle (position *c*) au moment où le courant est maximal et sa variation, par conséquent, nulle.

Après avoir atteint sa valeur maximale, le courant alternatif commence à diminuer. D'après la loi de Lenz, la F.É.M. d'auto-induction s'oppose à la décroissance du courant et, étant dirigée dans le sens du courant, elle le maintient (position *d*).

Ensuite, le courant alternatif décroît rapidement jusqu'à zéro. Une diminution brusque du courant dans la bobine provoque une diminution rapide du champ magnétique et puisque les lignes d'induction coupent les spires de la bobine, une F.É.M. d'auto-induction maximale est induite dans les spires (position *e*).

Pendant la deuxième moitié de la période de variation du courant, tout se répète de nouveau: quand le courant augmente la F.É.M. d'auto-induction s'oppose au courant et son sens est donc opposé (position *f*).

Lorsque le courant diminue, la F.É.M. d'auto-induction est dirigée dans le même sens que le courant et le maintient, de sorte qu'il ne peut disparaître instantanément (position *h*).

La figure montre que la F.É.M. d'auto-induction retarde sur le courant de 90° ou d'un quart de période. Etant donné que le flux magnétique est en phase avec le courant, on peut dire que la F.É.M. induite par le flux magnétique retarde sur lui de 90° ou d'un quart de période.

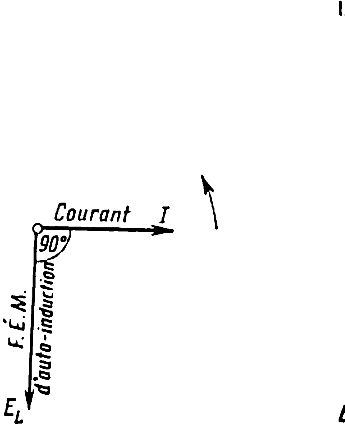


Fig. 146. Le courant dans la bobine est en avance de 90° sur la F.É.M. d'auto-induction

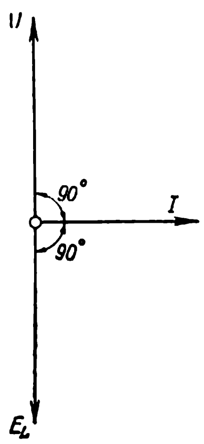


Fig. 147. La tension du réseau appliquée à une bobine est en avance de 90° sur le courant et est opposée à la F.É.M. d'auto-induction

On sait déjà que deux sinusoïdes décalées l'une par rapport à l'autre de 90° peuvent être représentées par deux vecteurs décalés d'un angle de 90° (fig. 146).

Puisque la F.É.M. d'auto-induction dans les circuits à courant alternatif s'oppose continuellement aux variations du courant pour que celui-ci puisse circuler dans les spires de la bobine, la tension du secteur doit équilibrer la F.É.M. d'auto-induction. Autrement dit, à chaque instant, la tension du secteur doit être égale et opposée à la F.É.M. d'auto-induction.

Nous désignerons par U (fig. 147) le vecteur de tension du secteur égal et opposé à la F.É.M. d'auto-induction E_L. Ce n'est que lorsqu'on applique aux bornes de la bobine une tension de secteur U égale et opposée à la F.É.M. d'auto-

induction E_L et donc l'équilibrant que la bobine peut être parcourue par un courant alternatif I.

Or, dans ce cas, la tension de secteur U sera en avance de 90° par rapport au courant I.

Ainsi, dans les circuits à courant alternatif, la F.É.M. d'auto-induction engendrée de façon continue provoque un déphasage entre le courant et la tension. En revenant à la figure 145, on voit que le courant i circule dans la bobine aussi lorsque la tension du secteur (courbe u_L) est nulle (position c) et même lorsque la tension du secteur est opposée au courant (positions d et h).

Notons donc que lorsque dans un circuit à courant alternatif la F.É.M. d'auto-induction est absente, la tension du secteur et le courant sont en phase. Mais une charge inductive dans les circuits à courant alternatif (enroulements des moteurs électriques et des génératrices, enroulements des transformateurs, bobines d'inductance) provoque toujours un déphasage entre le courant et la tension.

On peut démontrer que la vitesse de variation du courant est proportionnelle à la pulsation ω. On peut donc déterminer la valeur efficace de la F.É.M. d'auto-induction E_L d'après la formule:

$$E_L = \omega LI = 2\pi fLI.$$

Comme nous l'avons déjà dit, la tension appliquée aux bornes d'un circuit purement inductif doit être, à chaque instant, égale en grandeur à la F.É.M. d'auto-induction:

$$U_L = E_L,$$

ou

$$U_L = 2\pi fLI.$$

En désignant

$$2\pi fL = x_L, \quad \text{on obtient} \quad U_L = x_L I.$$

La formule de la loi d'Ohm pour un circuit à courant alternatif purement inductif sera la suivante:

$$I = \frac{U_L}{x_L}.$$

La grandeur x_L est appelée *réactance d'induction* (ou *réactance* tout court) *du circuit* et s'exprime en ohms. Ainsi, une réactance présente un obstacle qui s'oppose à la varia-

tion du courant dans le circuit. Elle est égale au produit de l'inductance par la pulsation :

$$x_L = \omega L.$$

La réactance d'induction d'un conducteur dépend de la fréquence du courant et de l'inductance du conducteur. Pour cette raison, la réactance d'une bobine branchée dans les circuits à courants de différentes fréquences n'est pas la même. Par exemple, si l'inductance d'une bobine est 0,05 H et elle est introduite dans un circuit dont la fréquence est 50 Hz, sa réactance est :

$$x_{L_1} = 2\pi f_1 L = 2\cdot 3{,}14\cdot 50\cdot 0{,}05 = 15{,}7 \text{ ohms},$$

et dans un circuit à fréquence de 400 Hz, elle est :

$$x_{L_2} = 2\pi f_2 L = 2\cdot 3{,}14\cdot 400\cdot 0{,}05 = 125{,}6 \text{ ohms}.$$

La partie de la tension du secteur destinée à vaincre (à équilibrer) la F.É.M. d'auto-induction est appelée *chute de tension inductive* ou *composante réactive de la tension* :

$$U_L = x_L I.$$

Considérons maintenant quelle est la puissance prise à une source de tension alternative lorsqu'une inductance est connectée à ses bornes.

La figure 148 donne les courbes représentant les valeurs instantanées de la tension, du courant et de la puissance pour le cas considéré. La valeur instantanée de la puissance est égale au produit de la valeur instantanée de la tension par la valeur instantanée du courant :

$$p = ui.$$

Comme on peut le voir sur cette figure, quand u et i ont les mêmes signes, la courbe de p est positive et se situe au-dessus de l'axe ωt. Mais si u et i ont des signes contraires, la courbe de p est négative et se situe au-dessous de l'axe ωt.

Pendant le premier quart de période, le courant et le flux magnétique de la bobine augmentent. La bobine prend de la puissance au secteur. L'aire comprise entre la courbe de p et l'axe ωt représente le travail (l'énergie) du courant électrique. Pendant le premier quart de période, l'énergie prise au secteur est utilisée pour créer un champ magnétique autour des spires de la bobine (puissance positive).

La quantité d'énergie accumulée par le champ magnétique pendant l'accroissement du courant peut être déterminée par la formule:

$$A_M = \frac{LI_m^2}{2}.$$

Pendant le deuxième quart de la période, le courant diminue. La F.É.M. d'auto-induction qui pendant le premier quart de période tendait à s'opposer à l'accroissement du

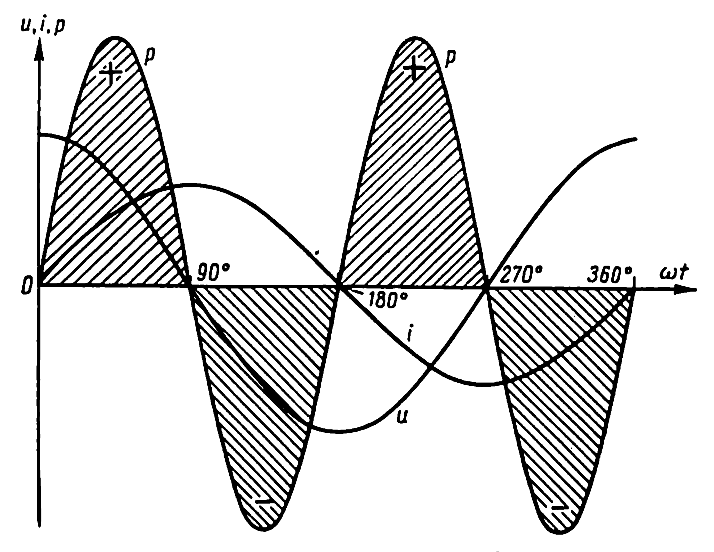


Fig. 148. Courbes des valeurs instantanées de la tension, du courant et de la puissance d'un circuit purement inductif

courant, maintenant, lorsque le courant commence à diminuer, tend à s'opposer à cette diminution. La bobine elle-même devient, pour ainsi dire, une génératrice d'énergie électrique. Elle rend au secteur l'énergie accumulée dans son champ magnétique. La puissance est négative et sur la figure 148 la courbe de p est située au-dessous de l'axe ωt.

Durant la deuxième demi-période, le phénomène se répète. Il se produit ainsi un échange de puissance entre la source de tension alternative et la bobine d'inductance. Au cours du premier et du troisième quart de période la puissance est absorbée par la bobine, tandis que lors des

deuxième et quatrième quarts la puissance est restituée à la source.

Dans ce cas, il n'y aura, en moyenne, aucune dépense de puissance bien qu'une tension U soit appliquée aux bornes du circuit et qu'il soit parcouru par un courant I.

Le même résultat est obtenu lorsqu'on calcule la puissance moyenne ou active d'après la formule indiquée plus haut :

$$P = UI\cos\varphi.$$

Dans le cas considéré, la tension et le courant sont déphasés de 90° et $\cos 90° = 0$.

Pour cette raison, la puissance active est également nulle de sorte qu'il n'y a pas de dépense d'énergie.

§ 87. EFFET DE PEAU

On sait que les lignes d'induction d'un champ autour d'un conducteur rectiligne parcouru par un courant ont la forme de cercles concentriques. Le champ magnétique existe aussi bien à l'intérieur du conducteur que dans l'espace environnant. Pour faciliter le problème, divisons un conducteur rectiligne parcouru par un courant en un certain nombre de fils de courant parallèles les uns aux autres. Plus un de ces fils est près de l'axe du conducteur, plus le flux magnétique se fermant à l'intérieur du conducteur qui l'embrasse est grand. L'inductance du fil de courant et la réactance sont proportionnelles au flux magnétique traversant ce fil. Pour cette raison, les fils se trouvant à l'intérieur du conducteur parcouru par un courant alternatif présentent une réactance d'induction supérieure à celle des fils périphériques. Ceci provoque une répartition non uniforme du courant dans la section du conducteur, de sorte que la densité du courant augmente depuis l'axe vers la surface du conducteur. Ce phénomène est connu sous le nom *d'effet de peau* ou *d'effet pelliculaire*. La répartition non uniforme de la densité de courant provoque un accroissement de la résistance du conducteur. La résistance du conducteur en courant alternatif, compte tenu de l'effet de peau, est appelée résistance effective à la différence de la résistance (ohmique) que ce conducteur oppose au courant continu.

A la fréquence standard de 50 Hz et une faible section de fils de cuivre, l'effet de peau se manifeste faiblement. Aux fréquences élevées et lorsque les conducteurs ont une grande section et sont faits en fils de fer, cet effet est beaucoup plus grand.

§ 88. CIRCUIT PUREMENT CAPACITIF

Si dans un circuit à courant continu on introduit un condensateur parfait (sans pertes), ce circuit après sa fermeture sera parcouru par un courant de charge pendant un temps très court. Lorsque la tension entre les lames

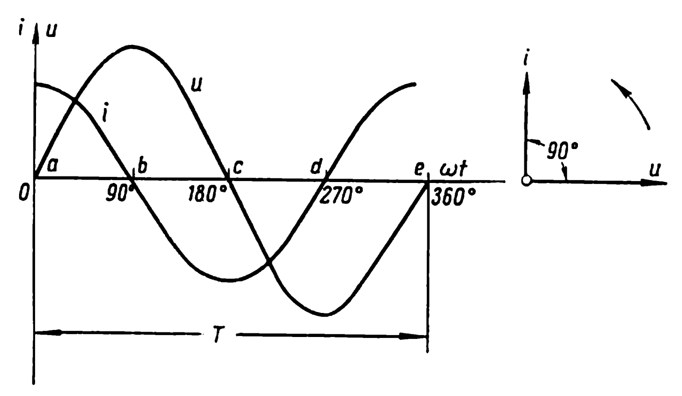


Fig. 149. Courbes et diagramme vectoriel d'un circuit purement capacitif

du condensateur atteint la tension de la source, le courant dans le circuit disparaît. Il en résulte que pour un courant continu un condensateur équivaut à une rupture ou à une résistance infiniment grande.

Mais, si l'on insère un condensateur dans un circuit à courant alternatif, il sera chargé alternativement dans l'un ou dans l'autre sens.

Dans ce cas, le circuit est parcouru par un courant alternatif. Considérons ce phénomène de plus près.

Au moment de fermeture du circuit la tension aux bornes du condensateur est nulle. Quand on branche le condensateur sur un réseau à tension alternative, il se charge pendant le premier quart de période, lorsque la tension augmente (fig. 149).

Avec l'accumulation des charges sur les armatures du condensateur, sa tension augmente jusqu'à ce que la tension du secteur atteint sa valeur maximale à la fin du premier quart de période. A ce moment la charge du condensateur cesse et le courant dans le circuit disparaît.

Le courant traversant le circuit du condensateur peut être déterminé d'après la formule:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t},$$

où q est la quantité d'électricité circulant dans le circuit.

En étudiant l'électrostatique on a vu que

$$q = Cu_C = Cu,$$

où C est la capacité du condensateur;

u est la tension du réseau;

u_C est la tension entre les armatures du condensateur.

On a donc définitivement pour le courant:

$$i = C\frac{\Delta u_C}{\Delta t} = C\frac{\Delta u}{\Delta t}.$$

Cette dernière expression montre que lorsque le rapport $\frac{\Delta u}{\Delta t}$ est maximal (positions a, c, e sur la fig. 149), le courant i est également maximal.

Lorsque $\frac{\Delta u}{\Delta t} = 0$ (positions b, d), i est également nul.

Pendant le deuxième quart de période, la tension du secteur diminue et le condensateur commence à se décharger. Le courant dans le circuit change de signe. Pendant la demi-période suivante, la tension du réseau change son sens et le condensateur se recharge; ensuite, il se décharge de nouveau. La figure 149 montre que lors de ses variations le courant parcourant un circuit purement capacitif dévance de 90° $\left(\frac{\pi}{2}\right)$ la tension entre les armatures du condensateur.

La comparaison des diagrammes vectoriels pour les circuits purement inductif et capacitif montre que l'inductance et la capacité agissent de façon opposée sur la phase du courant.

Puisque, comme il a été établi plus haut, la vitesse de variation du courant est proportionnelle à la pulsation ω, la formule

$$i = C\frac{\Delta u}{\Delta t}$$

permet de constater, par analogie, que la vitesse de variation de la tension est également proportionnelle à la pulsation ω. Pour la valeur efficace du courant on a alors:

$$I = 2\pi fCU.$$

En désignant $x_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C}$,

où x_C est la *réactance de capacité* (ou *capacitance*), on obtient la loi d'Ohm pour un circuit à courant alternatif purement capacitif:

$$I = \frac{U}{x_C}.$$

La tension entre les armatures du condensateur:

$$U_C = I_C x_C.$$

La partie de la tension du réseau agissant entre les armatures du condensateur est appelée *chute de tension capacitive*, ou composante réactive de tension, et est désignée par U_C.

La réactance de capacité x_C, comme la réactance d'induction x_L, dépend de la fréquence du courant alternatif. Mais si avec l'accroissement de la fréquence la réactance d'induction augmente, la réactance de capacité, au contraire, diminue.

Exemple 6. Calculer la réactance de capacité d'un condensateur de 5 µF à la fréquence de 50 Hz:

$$x_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\cdot 3,14\cdot 50\cdot 5\cdot 10^{-6}} = 636 \text{ ohms},$$

à la fréquence de 400 Hz:

$$x_C = \frac{1}{2\cdot 3,14\cdot 400\cdot 5\cdot 10^{-6}} = 79,5 \text{ ohms}.$$

En utilisant la formule de la puissance moyenne ou active pour le circuit considéré:

$$P = UI \cos\varphi.$$

Puisque dans un circuit purement capacitif le courant est de 90° en avance sur la tension, on a:

$$\varphi = 90°; \qquad \cos\varphi = 0.$$

Pour cette raison, la puissance active est aussi nulle car dans un tel circuit, comme dans un circuit purement inductif, il n'y a pas de dépense d'énergie.

La figure 150 montre la courbe de la puissance instantanée dans un circuit purement capacitif. Pendant le premier quart de période l'énergie que prend le circuit purement capacitif au réseau est accumulée sous forme de champ électrique du condensateur.

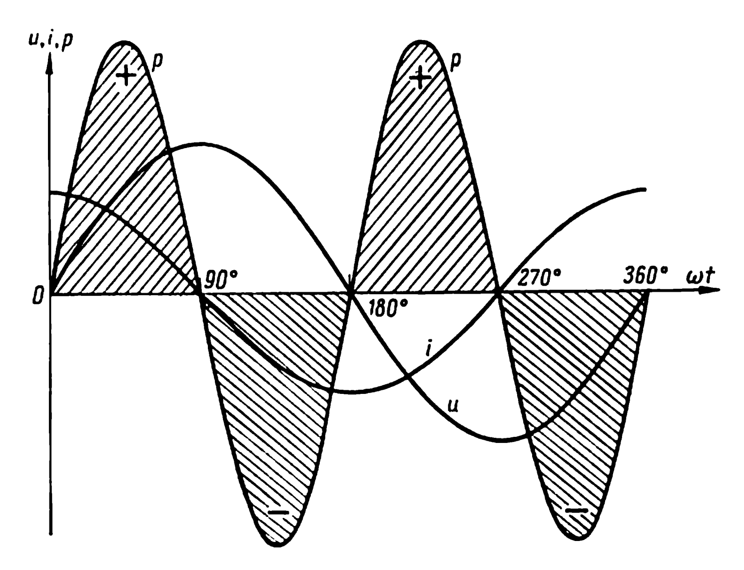


Fig. 150. Courbe de la puissance instantanée d'un circuit purement capacitif

Cette énergie du condensateur au moment où la tension appliquée passe par sa valeur maximale peut être déterminée par la formule suivante:

$$A_{é} = \frac{CU_m^2}{2} .$$

Pendant le quart de période suivant le condensateur se décharge sur le réseau en lui restituant l'énergie accumulée précédemment.

Pendant la deuxième demi-période, le phénomène se répète de sorte que dans un circuit purement capacitif il se produit un échange constant d'énergie entre le réseau et le condensateur sans perte d'énergie.

§ 89. CIRCUIT r ET L EN SÉRIE

Les symboles utilisés dans les schémas des circuits à courant alternatif pour les résistances et réactances sont indiqués sur la figure 151.

On trouve souvent dans la pratique des conducteurs présentant à la fois de la résistance, de la réactance d'induction et de la réactance de capacité.

Voyons quelle tension faut-il appliquer aux bornes d'une bobine d'inductance pour que cette dernière soit traversée par un courant alternatif. La bobine possède une résistance et une réactance d'induction. Pour cette raison, la tension du réseau doit équilibrer la chute de tension ohmique ainsi que la F.É.M. d'auto-induction qui apparaît dans la bobine.

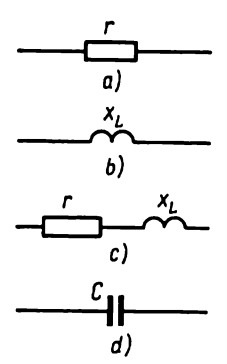


Fig. 151. Symboles des résistances et des réactances d'induction et de capacité dans les circuits à courant alternatif

Construisons pour ce cas le diagramme vectoriel et les courbes représentatives correspondantes.

Sur la figure 152, le vecteur I désigne le courant alternatif de la bobine. La F.É.M. d'auto-induction E_L dans la bobine est en retard de 90° sur le courant.

La part de la tension du réseau équilibrant la F.É.M. d'auto-induction est représentée par le vecteur U_L qui est égal et opposé au vecteur E_L. La part de la tension du réseau équilibrant la chute de tension dans la résistance est représentée par le vecteur U_a qui est en phase avec le courant. La tension du réseau doit être égale à la somme géométrique de la chute de tension ohmique U_a et de la chute de tension inductive U_L. On adopte la somme géométrique parce que U_a et U_L, comme on le voit sur la figure 152, sont représentées par des vecteurs et les vecteurs ne sont composés que géométriquement.

Ces deux tensions sont disposées sous un certain angle l'une par rapport à l'autre. Pour obtenir leur somme géométrique, il faut donc construire un parallélogramme sur les vecteurs U_a et U_L. La diagonale de ce dernier (la résultante) nous donne la tension du réseau.

La figure 152 montre que le vecteur de la tension du réseau U est en avance d'un certain angle φ sur le vecteur du courant I:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L}{U_a} = \frac{I x_L}{I r} = \frac{x_L}{r}.$$

Dans une bobine ne présentant que de la réactance, la tension du réseau était en avance de 90° sur le courant. Mais lorsqu'on tient compte aussi de la résistance ohmique,

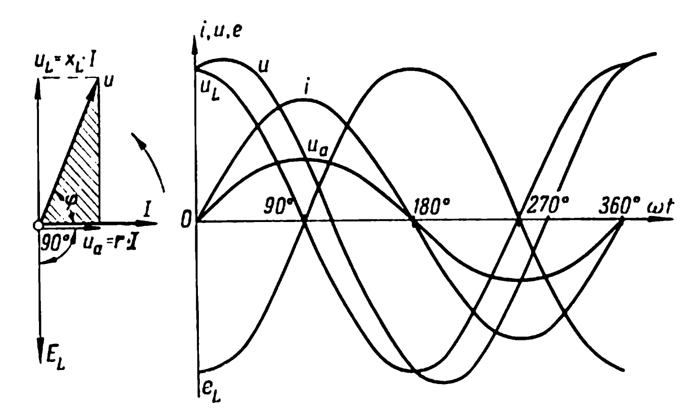


Fig. 152. Diagramme vectoriel et courbes pour un circuit r et L en série

la tension du réseau est en avance sur le courant d'un angle inférieur à 90°. C'est seulement lorsque l'inductance est nulle que le courant dans la bobine est en phase avec la tension du réseau.

Construisons la courbe de la puissance instantanée pour un circuit comportant une résistance et une inductance en série (fig. 153).

On voit d'après la courbe que la puissance moyenne ou active n'est pas nulle, comme c'était pour des circuits purement inductif ou capacitif. Dans ce cas, pendant une certaine partie de la période, la puissance dans le circuit est dépensée pour l'échauffement de la résistance et pour créer le champ magnétique de la bobine (puissance positive). Pendant l'autre partie de la période, la puissance est rendue au réseau (puissance négative).

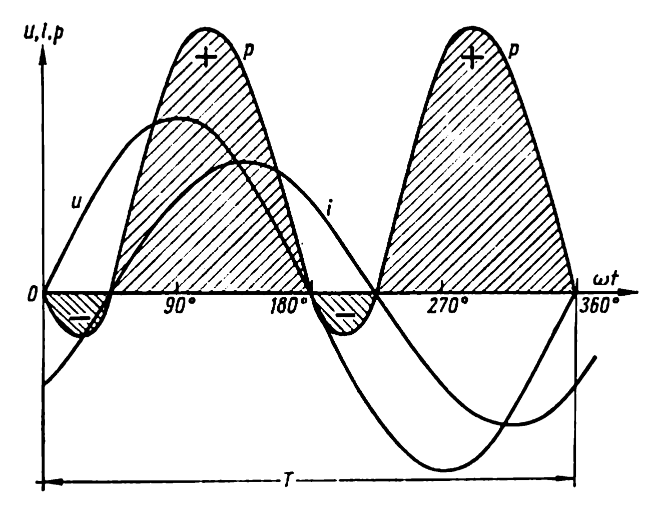


Fig. 153. Courbes de la puissance instantanée d'un circuit r et L en série

La puissance moyenne ou active P du courant alternatif dépend donc non seulement des valeurs de la tension U et du courant I, mais aussi du déphasage φ entre ces grandeurs. Plus le déphasage entre la tension et le courant est grand, c'est-à-dire plus l'angle φ est grand, plus le $\cos\varphi$ est faible et la puissance active est petite.

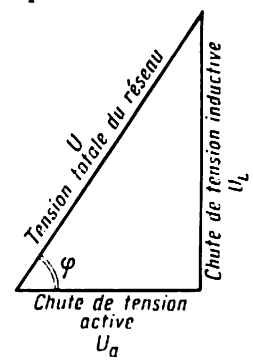


Fig. 154. Triangle des tensions

§ 90. TRIANGLE DES TENSIONS

Dessinons séparément (fig. 154) le triangle des tensions montré en hachures sur la figure 152. Puisqu'il s'agit d'un triangle rectangle, son côté inconnu peut être trouvé à l'aide du théorème de Pythagore (le carré de l'hypoténuse est égal à la somme des carrés des deux autres côtés). Par conséquent:

$$U^2 = U_a^2 + U_L^2,$$

d'où

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}.$$

Exemple 7. Quelle est la tension qu'il faut appliquer aux bornes d'une bobine pour y créer un courant de 5 A, si la résistance ohmique r de la bobine est égale à 6 ohms et la réactance d'induction x_L est égale à 8 ohms?

La chute de tension ohmique:

$$U_a = I \cdot r = 5 \cdot 6 = 30 \text{ V}.$$

La chute de tension inductive:

$$U_L = I \cdot x_L = 5 \cdot 8 = 40 \text{ V}.$$

La chute de tension totale est égale à la tension du réseau:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2} = \sqrt{30^2 + 40^2} = \sqrt{900 + 1600} = \sqrt{2500} = 50 \text{ V}.$$

Il est à noter que l'indication d'un voltmètre branché sur le réseau n'est pas égale à la somme algébrique des valeurs de U_a et U_L $(30 + 40 \neq 50)$.

§ 91. TRIANGLE DES IMPÉDANCES

Si l'on divise les côtés du triangle de tensions (fig. 155, *a*) par le courant I (fig. 155, *b*) les angles du triangle ne changent pas et on obtient un nouveau triangle semblable au premier et appelé triangle des impédances (fig. 155, *c*).

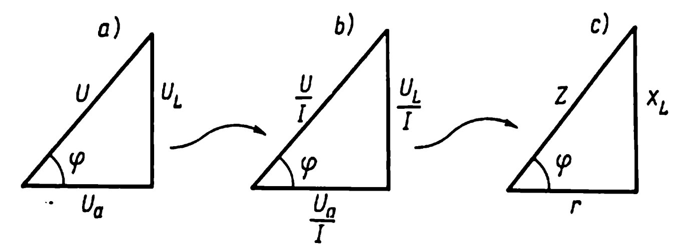


Fig. 155. Construction d'un triangle des impédances

Dans ce triangle, indiqué séparément sur la fig. 156, les côtés désignent la résistance et la réactance, et l'hypoténuse représente la résistance apparente ou l'impédance du circuit.

On voit d'après ce triangle que l'impédance z est égale à la somme géométrique de la résistance ohmique r et de la réactance d'induction x_L.

En appliquant le théorème de Pythagore au triangle des impédances, on obtient:

$$z^2 = r^2 + x_L^2$$

d'où

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}.$$

Si la résistance (ou la réactance) est, par exemple, 10 fois inférieure à l'autre, on peut négliger la grandeur

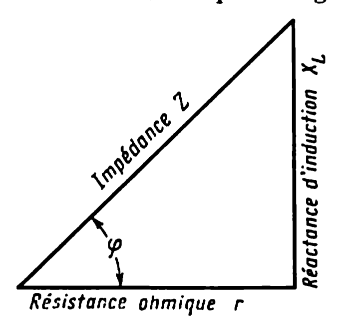


Fig. 156. Triangle des impédances

plus petite. On peut s'en convaincre facilement par le calcul direct.

Exemple 8. Calculer la résistance apparente d'un circuit dans lequel $r = 9$ ohms et $x_L = 12$ ohms.

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{9^2 + 12^2} = \sqrt{81 + 144} = \sqrt{225} = 15 \text{ ohms.}$$

Pour calculer la résistance apparente il serait faux de prendre la somme arithmétique de r et x_L, car

$$9 + 12 = 21 \text{ ohms,}$$

ce qui est faux.

Exemple 9. La résistance apparente de l'enroulement d'un électro-aimant $z = 25$ ohms. Sa résistance ohmique $r = 15$ ohms. Déterminer la réactance d'induction.

Puisque

$$z^2 = r^2 + x_L^2,$$

on a :

$$x_L^2 = z^2 - r^2,$$

d'où

$$x_L = \sqrt{z^2 - r^2}.$$

On a donc

$$x_L = \sqrt{25^2 - 15^2} = \sqrt{625 - 225} = \sqrt{400} = 20 \text{ ohms.}$$

Exemple 10. La réactance de l'enroulement d'un moteur à courant alternatif est égale à 14 ohms. La résistance apparente est de 22 ohms. Calculer la résistance ohmique de l'enroulement.

Puisque

$$z^2 = r^2 + x_L^2,$$

on a :

$$r^2 = z^2 - x_L^2,$$

d'où

$$r = \sqrt{z^2 - x_L^2}$$

et

$$r = \sqrt{22^2 - 14^2} = \sqrt{484 - 196} = \sqrt{288} = 16{,}97 \text{ ohms.}$$

Exemple 11. Quelle sera l'indication du voltmètre inséré dans le circuit de la figure 157 ?

$$U_a = I \cdot r = 5 \cdot 12 = 60 \text{ V}. \quad U_L = I \cdot x_L = 5 \cdot 16 = 80 \text{ V}.$$

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2} = \sqrt{60^2 + 80^2} = \sqrt{3600 + 6400} = \sqrt{10\,000} = 100 \text{ V}.$$

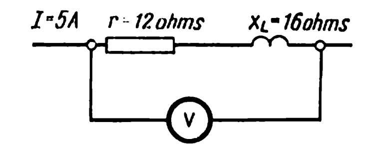


Fig. 157. Schéma pour l'exemple 11

Calculons la résistance apparente :

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{12^2 + 16^2} = \sqrt{144 + 256} = \sqrt{400} = 20 \text{ ohms.}$$

En multipliant z par le courant I, on obtient :

$$U = I \cdot z = 5 \cdot 20 = 100 \text{ V},$$

c'est-à-dire, le même résultat que précédemment.

Par conséquent, lorsque

$$U_a = I \cdot r$$

et

$$U_L = I x_L,$$

on a :

$$U = I z.$$

§ 92. LOI D'OHM POUR UN CIRCUIT r ET L EN SÉRIE

La formule $U = I \cdot z$ montre que

$$I = \frac{U}{z} \quad \text{ou} \quad I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}}.$$

C'est la formule de la loi d'Ohm pour un circuit comportant, en série, une résistance r et une inductance L.

Exemple 12. Calculer le courant passant par une bobine dont la réactance est de 5 ohms et la résistance de 1 ohm, lorsque la tension du réseau à courant alternatif est de 12 V.

Déterminons la résistance apparente de la bobine:

$$z=\sqrt{r^2+x_L^2}=\sqrt{1^2+5^2}=\sqrt{26}=5{,}1 \text{ ohms.}$$

En appliquant la loi d'Ohm au circuit comportant r et L, on obtient:

$$I=\frac{U}{z}=\frac{12}{5{,}1}=2{,}35 \text{ A.}$$

Dans le cas particulier, lorsque le circuit à courant alternatif comprend uniquement une résistance ohmique r, le courant est déterminé par la formule:

$$I=\frac{U}{r}.$$

Lorsque le circuit comporte une réactance d'induction et la résistance ohmique est tellement petite qu'on peut la négliger, la formule de la loi d'Ohm prend la forme suivante:

$$I=\frac{U}{x_L}.$$

Si l'on veut déterminer la résistance ohmique d'un récepteur à courant alternatif possédant une certaine

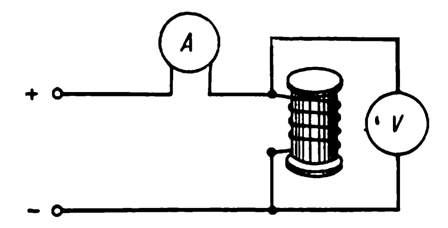


Fig. 158. Détermination de la résistance ohmique d'un récepteur à courant alternatif

résistance apparente (enroulement d'un moteur électrique, d'une bobine d'induction ou d'un électro-aimant), il faut insérer ce récepteur dans un circuit à courant continu (fig. 158). En divisant l'indication du voltmètre connecté aux bornes du récepteur par l'indication de l'ampèremètre branché en série dans le circuit, on obtient la valeur de la résistance ohmique puisque:

$$r=\frac{U}{I}.$$

Ceci est valable seulement pour des basses fréquences, lorsqu'on peut négliger l'effet de peau et admettre que la résistance effective du récepteur est égale à sa résistance en courant continu.

§ 93. CIRCUIT *r* ET *C* EN SÉRIE

La figure 159 donne le schéma et le diagramme vectoriel d'un circuit comportant, en série, une résistance ohmique et une capacité. La tension du réseau U représente la somme géométrique des chutes de tension dans les différentes

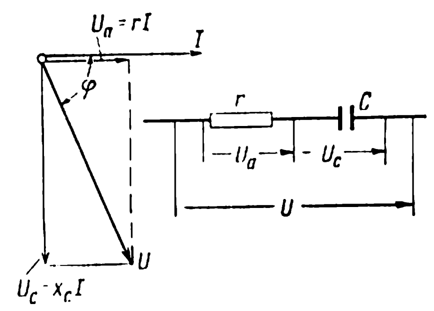


Fig. 159. Circuit *r* et *C* en série

portions du circuit, c'est-à-dire de la chute de tension active U_a en phase avec le courant et de la chute de tension dans la réactance de capacité U_C en retard de 90° sur le courant. La tension appliquée aux bornes du circuit est en retard sur le courant d'un angle φ, dont on peut calculer la tangente d'après le diagramme vectoriel de la figure 159:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_C}{U_a} = \frac{x_C I}{rI} = \frac{x_C}{r} = \frac{1}{r\omega C}.$$

La connexion en série d'une résistance ohmique et d'une capacité a une valeur pratique. Le branchement d'un condensateur ayant un diélectrique réel entre les lames dans un circuit à courant alternatif peut être représenté schématiquement comme une connexion en série de r et de C. Si la résistance du diélectrique était infiniment grande ($r = \infty$, cas d'un diélectrique parfait), le déphasage entre la tension et le courant serait égal à 90°. Mais le courant de conductibilité provoqué par l'imperfection du diélectrique diminue l'angle de déphasage. La différence entre 90° et

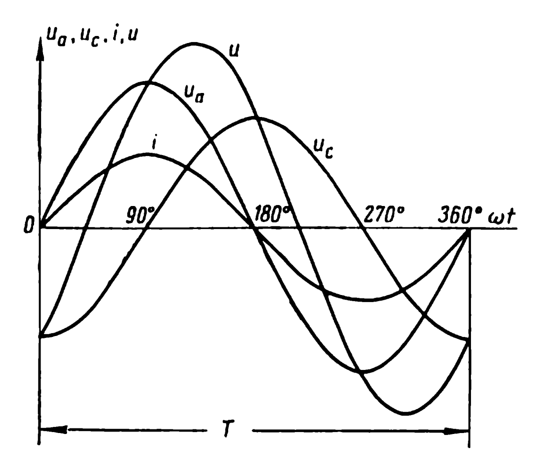


Fig. 160. Courbes des valeurs instantanées de la tension et du courant dans un circuit r et C en série

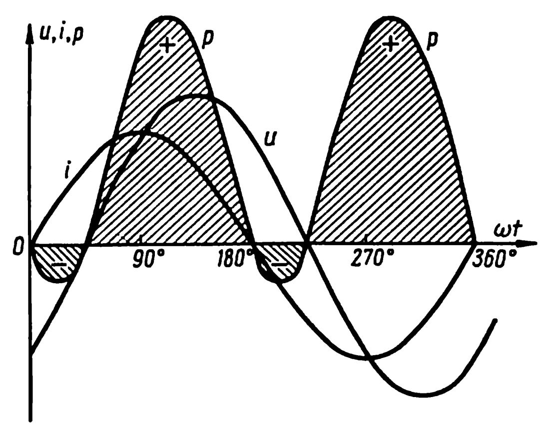


Fig. 161. Courbe de la puissance instantanée dans un circuit r et C en série

l'angle de déphasage de la tension sur le courant est désignée par la lettre δ (delta) et est appelée *angle de pertes diélectriques.*

La puissance des pertes dans un diélectrique ou les pertes diélectriques tout court sont déterminées par la formule :

$$P = U^2 \, 2\pi f C \operatorname{tg} \delta \text{ W},$$

où U est la tension en V;

f est la fréquence du courant en Hz;

C est la capacité du condensateur en F.

La figure 160 montre les courbes représentant les valeurs instantanées des tensions et du courant pour la connexion

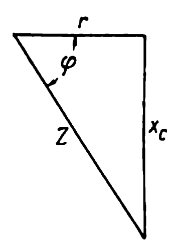


Fig. 162. Triangle des impédances pour un circuit r et C en série

en série de r et C. La courbe de la puissance instantanée pour ce cas est indiquée à la figure 161.

On voit d'après cette figure que pendant une certaine partie de la période l'énergie est dépensée dans le circuit pour l'échauffement de la résistance r et la création d'un champ électrique (puissance positive). Pendant l'autre partie de la période, l'énergie accumulée dans le champ électrique du condensateur est restituée au réseau. La puissance active est toujours égale à :

$$P = UI \cos \varphi.$$

D'après le diagramme vectoriel, on obtient :

$$U = \sqrt{I^2 r^2 + I^2 x_C^2} = I \sqrt{r^2 + x_C^2}.$$

En désignant

$$z = \sqrt{r^2 + x_C^2},$$

on obtient la loi d'Ohm pour un circuit comportant, en série, une résistance ohmique et une capacité (circuit r et C) :

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_C^2}},$$

où z est la résistance apparente (l'impédance) du circuit.

En divisant les côtés du triangle de tensions (fig. 159) par le courant I, on obtient le triangle des impédances pour ce circuit (fig. 162).

§ 94. CIRCUIT r, L ET C EN SÉRIE

La figure 163 montre le schéma et le diagramme vectoriel d'un circuit comportant, en série, une résistance ohmique, une inductance et une capacité.

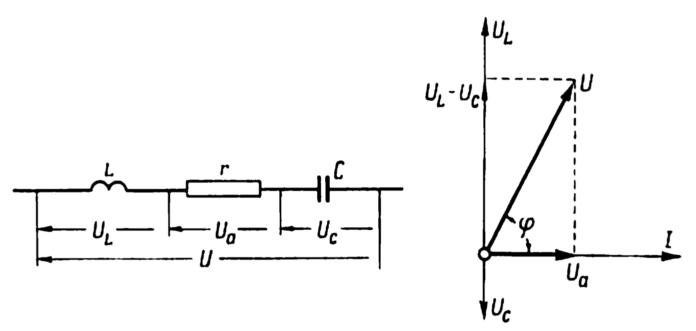


Fig. 163. Couplage en série de r, L et C

La tension aux bornes du circuit est égale à la somme des chutes de tension dans les différentes portions du circuit : chute de tension active et chutes de tension dans la réactance d'induction et dans la réactance de capacité.

Les tensions U_L et U_C se trouvent dans des phases opposées, autrement dit, elles sont déphasées l'une par rapport à l'autre d'une demi-période (180°). Pour cette raison, lors de la composition des vecteurs, on retranche ces tensions l'une de l'autre.

D'après le diagramme vectoriel on obtient :

$$U = \sqrt{I^2 r^2 + I^2 (x_L - x_C)^2} = I \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}.$$

La loi d'Ohm pour le circuit considéré est :

$$I=\frac{U}{\sqrt{r^2+(x_L-x_C)^2}}=\frac{U}{z},$$

où la résistance apparente du circuit :

$$z=\sqrt{r^2+(x_L-x_C)^2}.$$

Pour $x_L=x_C$, le courant dans le circuit est :

$$I=\frac{U}{r},$$

c'est-à-dire que le circuit se comporte comme s'il contenait seulement une résistance ohmique. Le courant et la tension du réseau sont alors en phase. C'est la *résonance de tension*,

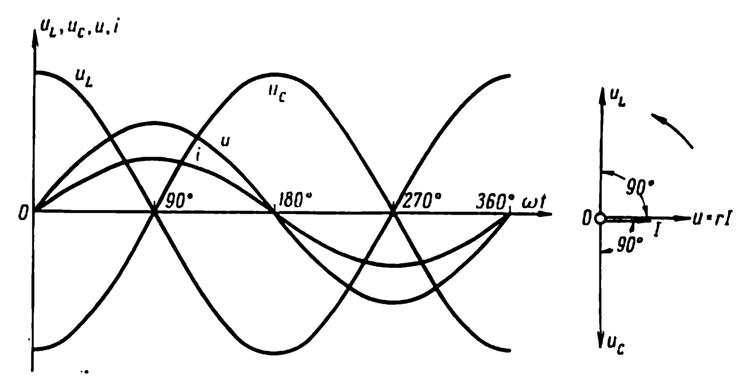


Fig. 164. Courbes et diagramme vectoriel pour la résonance de tension

appelée aussi *résonance série*. Les courbes et le diagramme vectoriel pour la résonance de tension sont indiqués sur la figure 164. La condition de résonance de tension est l'égalité :

$$x_L=x_C \quad \text{ou} \quad \omega L=\frac{1}{\omega C}.$$

Pour cette raison, la résonance de tension peut avoir lieu :

1) lorsque pour une inductance constante, la capacité varie et devient égale à :

$$C=\frac{1}{\omega^2 L};$$

2) lorsque pour une capacité constante l'inductance varie et devient égale à

$$L = \frac{1}{\omega^2 C};$$

3) lorsque la variation simultanée des deux grandeurs L et C amène à l'égalité :

$$\omega L = \frac{1}{\omega C};$$

4) lorsque, enfin, la pulsation du réseau varie et devient égale à

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Exemple 13. On a un circuit comportant, en série, une résistance ohmique $r = 6$ ohms, une réactance d'induction $x_L = 10$ ohms et une réactance de capacité $x_C = 2$ ohms. La tension aux bornes du circuit est de 120 V. Calculer le courant dans le circuit ainsi que le courant et les tensions à la résonance de tension lorsque $x_L = x_C =$ $= 10$ ohms.

Le courant dans le circuit

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{120}{\sqrt{6^2 + (10-2)^2}} = \frac{120}{10} = 12 \text{ A}.$$

Les tensions aux bornes des différentes portions du circuit :

$$U_a = Ir = 12 \cdot 6 = 72 \text{ V},$$

$$U_L = Ix_L = 12 \cdot 10 = 120 \ V,$$

$$U_C = Ix_C = 12 \cdot 2 = 24 \text{ V}.$$

Le courant à la résonance de tension

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120}{6} = 20 \text{ A}.$$

Les tensions au moment de la résonance :

$$U_a = Ir = 20 \cdot 6 = 120 \text{ V},$$

$$U_L = Ix_L = 20 \cdot 10 = 200 \text{ V},$$

$$U_C = Ix_C = 20 \cdot 10 = 200 \text{ V}.$$

Cet exemple montre qu'au moment de la résonance de tension le courant croît et les tensions aux bornes des différentes portions du circuit augmentent également. Dans certaines conditions cet effet peut présenter un danger pour les installations à courant alternatif, car un accroissement

excessif de la tension aux différentes portions du circuit peut provoquer le claquage des isolations des bobines et des appareils, le claquage des diélectriques utilisés dans les condensateurs, etc.

§ 95. CONDUCTANCE EN COURANT ALTERNATIF

La solution des problèmes liés au groupement en parallèle des circuits à courant alternatif se fait comme en courant continu en utilisant les conductances.

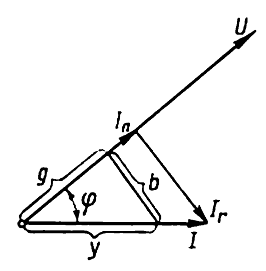


Fig. 165. Décomposition du courant en composantes active et réactive

Soit un diagramme vectoriel représenté par la figure 165. En projetant le vecteur du courant I sur la direction du vecteur de la tension U, décomposons le vecteur du courant en deux composantes.

L'une des composantes coïncide en direction avec le vecteur de tension et est appelée *composante active du courant*. Elle est désignée par la lettre I_a et est égale à:

$$I_a = I \cos \varphi.$$

L'autre composante, perpendiculaire au vecteur de la tension, est appelée *composante réactive du courant*. Elle est désignée par I_r et est égale à:

$$I_r = I \sin \varphi.$$

D'après la loi d'Ohm pour des circuits à courant alternatif on a:

$$I = \frac{U}{z}.$$

D'après le triangle des impédances, on obtient facilement :

$$\cos\varphi = \frac{r}{z}; \quad \sin\varphi = \frac{x}{z}.$$

En utilisant ces trois expressions, on obtient :

$$I_a = I\cos\varphi = \frac{U}{z}\cdot\frac{r}{z} = U\cdot\frac{r}{z^2}.$$

Par analogie avec la formule du courant continu ($I = Ug$), remplaçons $\frac{r}{z^2}$ par g. La formule obtenue a la forme suivante :

$$I_a = Ug.$$

La grandeur g est appelée *conductance.*

Conformément à ce qui a été exposé précédemment, on a :

$$I_r = I\sin\varphi = \frac{U}{z}\cdot\frac{x}{z} = U\cdot\frac{x}{z^2}.$$

En désignant $\frac{x}{z^2}$ par b, on obtient :

$$I_r = Ub.$$

La grandeur b est appelée *susceptance.*

Enfin,

$$I = \frac{U}{z} = U\frac{1}{z}.$$

En désignant $\frac{1}{z}$ par y on obtient :

$$I = U\cdot y.$$

La grandeur y est appelée *admittance.*

La conductance, la susceptance et l'admittance sont mesurées en $\frac{1}{\text{ohm}}$ (siemens).

La figure 165 représente un triangle de courants avec les côtés I, I_a, I_r.

D'après le théorème de Pythagore, on a :

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 \quad \text{ou} \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}.$$

En divisant tous les côtés du triangle des courants par U :

$$\frac{I_a}{U} = g; \quad \frac{I_r}{U} = b; \quad \frac{I}{U} = y,$$

on obtient un triangle des conductances avec les côtés g, b et y.

De ce triangle on tire:

$$y^2 = g^2 + b^2 \quad \text{ou} \quad y = \sqrt{g^2 + b^2}.$$

§ 96. GROUPEMENTS EN PARALLÈLE

La figure 166 (à gauche) représente la connexion en parallèle de deux branches comportant respectivement r_1, L_1 et r_2, L_2.

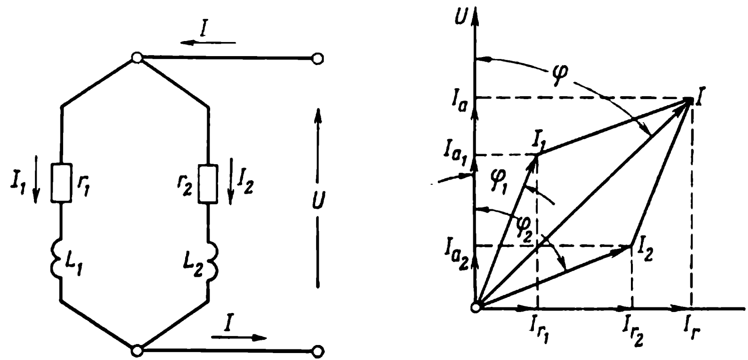


Fig. 166. Groupement en parallèle des branches r_1, L_1 et r_2, L_2

Les impédances des branches sont:

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2};$$

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + (\omega L_2)^2}.$$

Les courants dans les branches sont:

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}};$$

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{U}{\sqrt{r_2^2 + (\omega L_2)^2}}.$$

Les angles de déphasage entre la tension et les courants dans les branches sont:

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} \quad \text{et} \quad \cos \varphi_2 = \frac{r_2}{z_2}.$$

Sur la figure 166, à droite, on voit le diagramme vectoriel pour le groupement en parallèle des branches r_1, L_1 et r_2, L_2. La construction du diagramme commence par la construction du vecteur de la tension car la tension est la même pour les deux branches. Vu la présence de r et de L dans les branches, les courants I_1 et I_2 sont en retard de l'angle φ_1 et φ_2 respectivement sur la tension U.

En construisant les vecteurs des courants I_1 et I_2 et en les composant d'après la règle du parallélogramme, on obtient le vecteur du courant résultant I circulant dans la portion commune du circuit. On voit d'après le diagramme que :

$$I_a = I_{a1} + I_{a2}.$$

En remplaçant les expressions des courants par le produit de la tension par la conductance, on obtient

$$Ug = Ug_1 + Ug_2$$

ou

$$g = g_1 + g_2.$$

Par analogie :

$$I_r = I_{r1} + I_{r2};$$

$$Ub = Ub_1 + Ub_2;$$

$$b = b_1 + b_2.$$

Le courant total est :

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = \sqrt{U^2g^2 + U^2b^2} = U\sqrt{g^2 + b^2} = Uy.$$

Ainsi, le circuit possède une conductance et une susceptance égales à la somme des conductances et des susceptances partielles des branches.

Exemple 14. Pour le circuit de la figure 166 on a :

$r_1 = 4$ ohms ; $L_1 = 0{,}01$ H ; $r_2 = 3$ ohms ; $L_2 = 0{,}02$ H.

La tension du réseau est égale à 127 V et la fréquence à 50 Hz. Déterminer les courants dans les branches et le courant total.

S o l u t i o n.

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2} = \sqrt{4^2 + (2\cdot 3{,}14\cdot 50\cdot 0{,}01)^2} = 5{,}075 \text{ ohms};$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} = \frac{4}{5{,}075} = 0{,}788; \quad \varphi_1 = 38°;$$

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + (\omega L_2)^2} = \sqrt{3^2 + (2\cdot 3{,}14\cdot 50\cdot 0{,}02)^2} = 6{,}95 \text{ ohms};$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} = \frac{3}{6{,}95} = 0{,}432; \quad \varphi_2 = 64°20';$$

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{127}{5{,}075} = 25 \text{ A}; \quad I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{127}{6{,}95} = 18{,}3 \text{ A}.$$

Pour calculer le courant I, on détermine les conductances :

$$g_1 = \frac{r_1}{z_1^2} = \frac{4}{5{,}075^2} = 0{,}155 \frac{1}{\text{ohm}};$$

$$b_1 = \frac{x_1}{z_1^2} = \frac{314\cdot 0{,}01}{5{,}075^2} = 0{,}122 \frac{1}{\text{ohm}};$$

$$g_2 = \frac{r_2}{z_2^2} = \frac{3}{6{,}95^2} = 0{,}0622 \frac{1}{\text{ohm}};$$

$$b_2 = \frac{x_2}{z_2^2} = \frac{314\cdot 0{,}02}{6{,}95^2} = 0{,}13 \frac{1}{\text{ohm}};$$

$$g = g_1 + g_2 = 0{,}155 + 0{,}0622 = 0{,}2172 \frac{1}{\text{ohm}};$$

$$b = b_1 + b_2 = 0{,}122 + 0{,}13 = 0{,}252 \frac{1}{\text{ohm}};$$

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{0{,}2172^2 + 0{,}252^2} = 0{,}332 \frac{1}{\text{ohm}}.$$

Le courant total parcourant la portion commune du circuit est :

$$I = Uy = 127\cdot 0{,}332 = 42{,}2 \text{ A};$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{b}{g} = \frac{0{,}252}{0{,}2172} = 1{,}16; \quad \varphi = 49°15'.$$

Considérons le groupement en parallèle des branches comportant L et C (fig. 167, à gauche).

Les impédances des branches sont :

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2};$$

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2}.$$

Les courants des branches sont :

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}} ;$$

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{U}{\sqrt{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2}} .$$

Les angles de déphasage entre la tension et les courants dans les branches sont :

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} ;$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} .$$

On commence le diagramme vectoriel indiqué sur la figure 167 (à droite) par la construction du vecteur de la

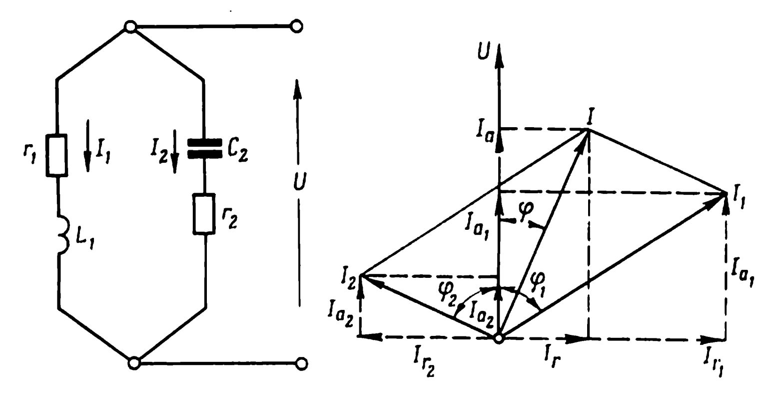


Fig. 167. Groupement en parallèle des branches L et C

tension U. Ensuite, sous les angles φ_1 et φ_2, on construit les vecteurs des courants I_1 et I_2. Il est à noter que le courant I_1 dans la branche contenant l'inductance est en retard d'un angle φ_1 sur la tension et le courant I_2 dans le circuit comprenant la capacité est en avance d'un angle φ_2 sur la tension. En composant les vecteurs des courants I_1 et I_2 suivant la règle du parallélogramme, on obtient le vecteur du courant I.

On voit d'après le diagramme vectoriel que

$$I_a = I_{a1} + I_{a2}$$

ou

$$Ug = Ug_1 + Ug_2,$$

d'où

$$g = g_1 + g_2.$$

Par conséquent, la conductance totale du circuit est égale à la somme des conductances partielles.

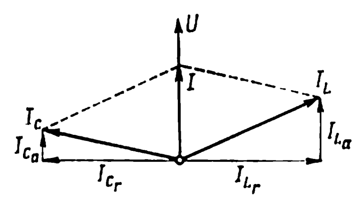


Fig. 168. Diagramme vectoriel pour la résonance de courants

Déterminons la susceptance du groupement :

$$I_r = I_{r1} - I_{r2}$$

ou

$$Ub = Ub_1 - Ub_2,$$

d'où

$$b = b_1 - b_2,$$

où b_2 est la susceptance du circuit comprenant une capacité, égale à :

$$b_2 = \frac{x_C}{z_2^2} = \frac{\frac{1}{\omega C_2}}{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2} \frac{1}{\text{ohm}} .$$

De cette façon, la susceptance totale du circuit est égale à la différence des susceptances partielles.

Par un choix convenable des paramètres L, C, r_1, r_2 ou de la fréquence f on peut obtenir que le courant total I soit en phase avec la tension du réseau U. Ce cas est connu sous le nom de *résonance de courants* (ou *résonance parallèle* ou, enfin, *antirésonance*).

Comme le montre la figure 168, la résonance de courants a lieu lorsque les composantes réactives des courants

dans les branches comprenant une inductance I_{Lr} et une capacité I_{Cr} sont égales, c'est-à-dire que $I_{Lr} = I_{Cr}$. A cette condition, le courant I total est en phase avec la tension U.

En choisissant convenablement l'inductance, la capacité et les résistances des branches parallèles, on peut faire de sorte que le courant total I dans la portion commune du circuit soit petit, tandis que les courants dans les branches à inductance et à capacité soient très grands.

Exemple 15. Pour le circuit de la figure 167 on a : $r_1 = 5$ ohms; $L_1 = 0{,}05$ H ; $r_2 = 5$ ohms; $C_2 = 100$ µF. La tension du réseau est égale à 220 V et la fréquence à 50 Hz.

Déterminer les courants dans les branches et dans la portion commune du circuit.

Solution.

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 314 \frac{1}{s};$$

$$z_1 = \sqrt{r^2 + (\omega L_1)^2} = \sqrt{5^2 + (314 \cdot 0{,}05)^2} = 16{,}5 \text{ ohms};$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} = \frac{5}{16{,}5} = 0{,}303, \quad \varphi_1 = 72°20';$$

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2} = \sqrt{5^2 + \left(\frac{1}{314 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}\right)^2} = 32{,}2 \text{ ohms};$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} = \frac{5}{32{,}2} = 0{,}155; \quad \varphi_2 = 81°.$$

Les courants dans les branches sont :

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{220}{16{,}5} = 13{,}33 \text{ A};$$

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{220}{32{,}2} = 6{,}84 \text{ A}.$$

Les conductances des branches sont :

$$g_1 = \frac{r_1}{z_1^2} = \frac{5}{16{,}5^2} = 0{,}0184 \frac{1}{\text{ohm}};$$

$$g_2 = \frac{r_2}{z_2^2} = \frac{5}{32{,}2^2} = 0{,}0048 \frac{1}{\text{ohm}}.$$

Les susceptances sont :

$$b_1 = \frac{x_1}{z_1^2} = \frac{314 \cdot 0{,}05}{16{,}5^2} = 0{,}0579 \frac{1}{\text{ohm}};$$

$$b_2 = \frac{x_2}{z_2^2} = \frac{\frac{1}{314 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}}{32{,}2^2} = 0{,}0307 \frac{1}{\text{ohm}}.$$

La conductance, la susceptance et l'admittance du circuit sont respectivement :

$$g = g_1 + g_2 = 0,0184 + 0,0048 = 0,0232 \frac{1}{\text{ohm}};$$

$$b = b_1 - b_2 = 0,0579 - 0,0307 = 0,0272 \frac{1}{\text{ohm}};$$

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{0,0232^2 + 0,0272^2} = 0,0358 \frac{1}{\text{ohm}}.$$

Le courant dans la portion commune du circuit est :

$$I = Uy = 220 \cdot 0,0358 = 7,9 \text{ A};$$

$$\text{tg}\,\varphi = \frac{b}{g} = \frac{0,0272}{0,0232} = 1,17; \quad \cos\varphi = 0,649;$$

$$\varphi = 49°30'.$$

§ 97. CIRCUIT OSCILLANT

En examinant le groupement en parallèle d'une inductance et d'une capacité, nous avons vu que le courant dans la portion commune du circuit peut être faible, tandis que les courants dans les branches parallèles peuvent atteindre

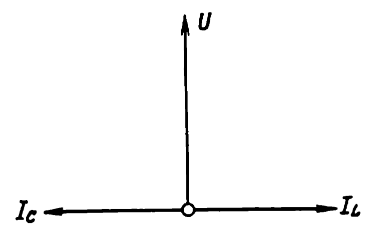


Fig. 169. Diagramme vectoriel simplifié d'un circuit à résonance de courants

de grandes valeurs. Lorsque les résistances des branches parallèles sont nulles, les courants qui les parcourent sont déphasés de 90° par rapport à la tension appliquée. Mais si on obtient aussi l'égalité de la réactance d'induction et de la réactance de capacité ($x_L = x_C$), les branches seront parcourues par des courants égaux. Le courant résultant sera alors nul.

Le diagramme vectoriel pour un tel cas est représenté sur la figure 169.

Puisque le courant résultant est nul, on peut débrancher les fils de la source de tension alternative. Le circuit fermé comprenant une bobine et un condensateur sera parcouru par un courant alternatif.

Jusqu'à présent nous avons examiné les cas où les circuits électriques étaient parcourus par des courants provenant des génératrices. Nous allons maintenant considérer le cas où le courant alternatif est produit par la décharge d'un condensateur sur une bobine.

Un condensateur chargé possède une réserve d'énergie électrique. Lorsqu'il débite sur une bobine, il commence à se décharger et cette réserve diminue. En parcourant les spires de la bobine, le courant de décharge du condensateur crée un champ magnétique. La bobine commence donc à accumuler de l'énergie magnétique. Lorsque le condensateur est complètement déchargé, son énergie électrique devient nulle. A cet instant, la bobine possède la réserve maximale d'énergie magnétique. Maintenant, la bobine elle-même devient génératrice de courant électrique et commence à recharger le condensateur. La F.É.M. d'auto-induction qui apparaît dans la bobine lors de l'accroissement du champ magnétique s'opposait au passage du courant. Mais maintenant, lorsque le champ magnétique de la bobine commence à diminuer, la F.É.M. d'auto-induction tend à maintenir le courant dans le sens de sa circulation. A l'instant où l'énergie magnétique de la bobine devient nulle les armatures du condensateur sont chargées, mais elles ont des signes contraires par rapport à ceux qu'elles avaient au début, et si la résistance ohmique du circuit est nulle, le condensateur acquiert la réserve initiale d'énergie électrique. Ensuite le condensateur commence de nouveau à se décharger, le courant dans le circuit circule, cette fois en sens inverse et tout le cycle se répète.

Les transformations de l'énergie électrique en énergie magnétique et inversement sont à la base du phénomène des oscillations électromagnétiques. Un circuit comprenant une capacité et une inductance et étant le siège d'oscillations électromagnétiques est appelé *circuit oscillant.*

Les oscillations périodiques de l'énergie dans un circuit oscillant pourraient continuer infiniment sous forme des oscillations auto-entretenues s'il n'y avait pas de pertes dans le circuit oscillant lui-même. Mais l'existence d'une certaine résistance ohmique fait que la réserve d'énergie

du circuit diminue avec chaque période à cause des pertes thermiques qui se produisent dans la résistance ohmique, de sorte que les oscillations s'amortissent peu à peu.

La période des oscillations électromagnétiques ayant lieu dans un circuit oscillant sans résistance ohmique est déterminée par la formule de Thompson:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}\ \text{s}.$$

La grandeur T est appelée *période propre des oscillations du circuit.*

La fréquence propre f des oscillations du circuit est déterminée par la formule:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\ \frac{1}{\text{s}}.$$

On voit que la période d'une oscillation peut être modifiée en faisant varier soit l'inductance de la bobine, soit la capacité du condensateur. Les deux méthodes sont utilisées en radiotechnique.

Le circuit oscillant est un élément indispensable de chaque récepteur ou émetteur radio.

Le principe de l'émission radio-électrique est le suivant. A l'aide d'un générateur à tube on crée des oscillations électromagnétiques dans l'antenne du poste émetteur. L'amplitude des oscillations dépend de plusieurs facteurs, y compris de l'intensité du courant passant dans le circuit du microphone qui capte les oscillations acoustiques produites par la voix ou la musique.

La variation des oscillations à haute fréquence à l'aide des oscillations à fréquence acoustique est appelée *modulation.*

L'antenne du poste émetteur émet dans l'espace des ondes électromagnétiques modulées. Lorsque les ondes radioélectriques atteignent l'antenne du récepteur, elles y induisent une faible F.É.M. dont la fréquence est égale à celle de l'onde qui arrive. Maintenant, il faut que l'auditeur puisse accorder son poste récepteur sur l'onde requise choisie parmi les autres ondes d'émission des nombreuses stations de radio. A cette fin, l'antenne est connectée à un circuit oscillant. En faisant varier la capacité ou l'inductance, on peut obtenir la résonance dans le circuit de sorte que la F.É.M. alternative induite dans l'antenne réceptrice soit fortement amplifiée. L'amplification ultérieure des

oscillations reçues est assurée à l'aide de tubes électroniques et de transistors. La fréquence des oscillations électromagnétiques employée en radiotechnique est très grande (elle est de l'ordre de plusieurs millions de Hz). Ces oscillations ne peuvent pas être transformées directement en oscillations de la membrane d'un écouteur téléphonique pour agir sur l'oreille. Pour cette raison, les oscillations à haute fréquence modulées émises par l'antenne du poste émetteur et captées par le récepteur doivent être d'abord démodulées (*détectées*). La détection est assurée à l'aide d'un détecteur à cristal, des tubes électroniques ou des semi-conducteurs. Les oscillations à basse fréquence obtenues après la détection sont amplifiées et dirigées vers un haut-parleur.

La première liaison radio-électrique fut réalisée par le savant russe A. Popov (1859-1905).

§ 98. TRIANGLE DES PUISSANCES

Si l'on multiplie les côtés d'un triangle des tensions (fig. 170, *a*) par le courant I (fig. 170, *b*), on obtient le triangle des puissances (fig. 170, *c*). Tous les côtés du triangle des puissances, montré séparément sur la figure 171, représentent des puissances.

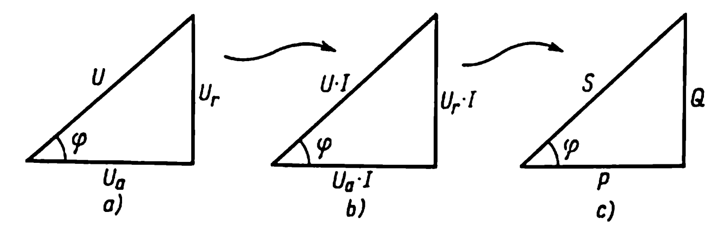


Fig. 170. Construction d'un triangle des puissances

L'hypoténuse du triangle représente la puissance apparente S.

$$S = UI.$$

Elle est mesurée en volts-ampères (VA) ou en kilovolts-ampères (kVA) d'après les indications d'un voltmètre et d'un ampèremètre. La valeur de la puissance apparente caractérise les principaux gabarits (les dimensions maximales) des alternateurs et des transformaters. En réalité,

l'isolation des enroulements des alternateurs et des transformateurs est prévue pour une tension déterminée et la valeur du courant détermine l'échauffement de ces enroulements (I^2r).

Le côté adjacent de l'angle φ représente la puissance active P:

$$P = U_a I.$$

Etant donné que $U_a = Ir$, on a:

$$P = I^2 r.$$

La puissance active dans les circuits à courant alternatif est dépensée pour l'échauffement. Dans les moteurs à courant alternatif la plus grande partie de la puissance active se transforme en puissance mécanique.

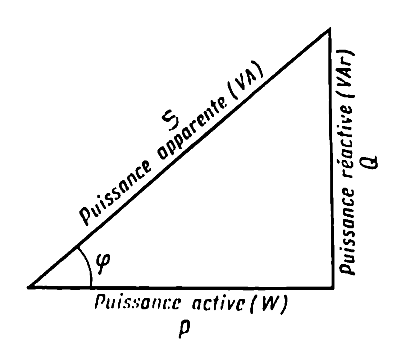


Fig. 171. Triangle des puissances

La puissance active est mesurée à l'aide d'un wattmètre et s'exprime en watts (W) ou en kilowatts (kW). Le triangle des puissances donne:

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi.$$

La puissance active caractérise le degré de charge du moteur primaire entraînant l'alternateur.

Le côté opposé à l'angle φ représente la puissance réactive Q:

$$Q = U_r I.$$

Puisque $U_r = Ix$ (où x est la réactance inductive), on a:

$$Q = I^2 x.$$

La puissance réactive est due à la présence des champs magnétiques et électriques dans les inductances et les capacités des circuits. Le triangle des puissances donne:

$$Q = S \sin \varphi = UI \sin \varphi.$$

La puissance réactive est mesurée en volts-ampères réactifs (VAr) ou en kilovolts-ampères réactifs (kVAr). En appliquant le théorème de Pythagore on obtient :

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

ou

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Examinons le circuit électrique indiqué sur la figure 172, comportant une inductance et une résistance ainsi que des

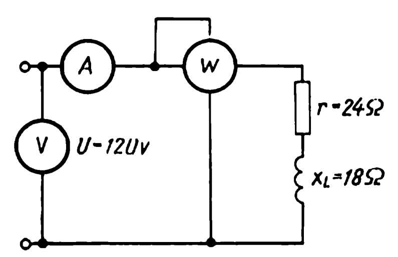


Fig. 172. Circuit électrique comportant une résistance, une réactance d'induction et des appareils de mesure

appareils de mesure tels qu'un ampèremètre, un voltmètre et un wattmètre. L'organisation du wattmètre est décrite dans le chapitre XIV.

1. Lorsqu'on applique à ce circuit une tension continue, il nous reste dans le circuit seulement la résistance r, car l'inductance x_L en courant continu est nulle, et on a alors:

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120}{24} = 5 \text{ A}.$$

L'ampèremètre indiquera un courant de 5 A.

La puissance:

$$P = IU = 5 \cdot 120 = 600 \text{ W}$$

ou

$$P = I^2 r = 25 \cdot 24 = 600 \text{ W}.$$

Le wattmètre indiquera donc 600 W. Un wattmètre branché dans un circuit à courant continu indique donc une puissance en watts absorbée par le circuit. L'indication du wattmètre est égale au produit des indications du voltmètre et de l'ampèremètre.

2. Connectons le même circuit à un réseau à tension alternative.

Dans ce cas

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{24^2 + 18^2} = \sqrt{900} = 30 \text{ ohms.}$$

Le courant dans le circuit :

$$I = \frac{U}{z} = \frac{120}{30} = 4 \text{ A.}$$

L'ampèremètre indiquera un courant de 4 A.

Calculons la puissance dépensée pour l'échauffement :

$$P = I^2 r = 4^2 \cdot 24 = 384 \text{ W.}$$

L'indication du wattmètre dans ce cas sera de 384 W. La puissance apparente prise par le circuit à la source de courant alternatif est :

$$S = IU = 4 \cdot 120 = 480 \text{ VA.}$$

Par conséquent, l'alternateur qui alimente ce circuit fournit une puissance apparente $S = 480$ VA. Mais dans le circuit lui-même, seule la puissance active $P = 384$ W est définitivement perdue sous forme de chaleur.

On voit donc qu'un circuit à courant alternatif comprenant une résistance et une inductance dépense pour l'échauffement seulement une partie de l'énergie reçue. Le reste, l'énergie réactive, tantôt est pris par le circuit à l'alternateur et emmagasiné dans le champ magnétique de la bobine tantôt est restitué à l'alternateur.

§ 99. FACTEUR DE PUISSANCE (COS φ)

On appelle facteur de puissance ou cos φ d'un circuit le rapport de la puissance active à la puissance apparente,

$$\text{Facteur de puissance} = \frac{\text{puissance active } P}{\text{puissance apparente } S}.$$

Dans le cas général, la puissance active est inférieure à la puissance apparente, c'est-à-dire que dans cette frac-

tion le numérateur est inférieur au dénominateur et le facteur de puissance est donc inférieur à l'unité.

C'est seulement dans le cas d'une charge purement ohmique, où toute la puissance est active, que le numérateur et le dénominateur de cette fraction sont égaux l'un à l'autre et, pour cette raison, le facteur de puissance est égal à l'unité.

L'énergie réactive est absorbée par la charge et, si on ne prend pas de mesures spéciales, elle chargera la ligne allant de l'alternateur vers la charge. On ne peut pas éliminer l'énergie réactive d'un circuit comprenant une charge inductive, mais il est nécessaire de décharger l'alternateur de la puissance réactive.

Plus la puissance active s'approche de la puissance apparente, moins le numérateur diffère du dénominateur de la fraction et plus le facteur de puissance est proche de l'unité. Le problème consiste à faire circuler dans la ligne allant vers le récepteur la valeur minimale nécessaire de l'énergie réactive.

Le triangle des puissances (voir fig. 171) nous donne:

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi.$$

Le $\cos \varphi$, ou le facteur de puissance, est mesuré à l'aide d'un appareil spécial appelé *phasemètre*, dont la description est donnée dans le chapitre XIV.

Exemple 16. L'ampèremètre indique un courant de 10 A, le voltmètre indique 120 V, le wattmètre indique 1 kW.

Déterminer le $\cos \varphi$ du récepteur.

$$S = IU = 10 \cdot 120 = 1200 \text{ VA}.$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{1000}{1200} = 0{,}83.$$

Exemple 17. Déterminer la puissance active fournie par une génératrice à courant alternatif monophasé au réseau lorsque le voltmètre sur le tableau de la génératrice indique 220 V, l'ampèremètre 20 A et le phasemètre 0,8.

$$P = IU \cos \varphi = 20 \cdot 220 \cdot 0{,}8 = 3520 \text{ W} = 3{,}52 \text{ kW}.$$

La puissance apparente:

$$S = IU = 20 \cdot 220 = 4400 \text{ VA} = 4{,}4 \text{ kVA}.$$

Exemple 18. Le voltmètre monté sur le tableau d'un moteur électrique indique 120 V, l'ampèremètre indique 450 A et le wattmètre 50 kW. Déterminer z, r, x_L, S, $\cos\varphi$, Q.

$$z=\frac{U}{I}=\frac{120}{450}=0,267 \text{ ohm}.$$

Puisque $P=I^2\cdot r$, on a :

$$r=\frac{P}{I^2}=\frac{50\,000}{450^2}=0,247 \text{ ohm},$$

$$x_L=\sqrt{z^2-r^2}=$$
$$=\sqrt{0,267^2-0,247^2}=$$
$$=\sqrt{0,01}=0,1 \text{ ohm},$$
$$S=IU=450\cdot120=$$
$$=54\,000 \text{ VA}=54 \text{ kVA},$$
$$\cos\varphi=\frac{P}{S}=\frac{50\,000}{54\,000}=0,927,$$
$$Q=\sqrt{S^2-P^2}=\sqrt{54\,000^2-50\,000^2}=$$
$$=\sqrt{416\,000\,000}=$$
$$=20\,396 \text{ VAr}=20,396 \text{ kVAr}.$$

Fig. 173. Détermination du facteur de puissance à partir du triangle des impédances, du triangle des tensions et du triangle des puissances

On voit par la construction des triangles des impédances, des tensions et des puissances pour un circuit déterminé que ces triangles sont semblables, car leurs côtés sont proportionnels. Chacun de ces trois triangles permet de calculer le $\cos\varphi$ du circuit, comme il est indiqué sur la figure 173. On peut s'en servir pour résoudre divers problèmes.

Exemple 19. Déterminer z, x_L, U, U_a, U_L, S, P, Q lorsqu'on a $I=6$ A, $r=3$ ohms, $\cos\varphi=0,8$ et le courant est en retard sur la tension.

Il vient du triangle des résistances :

$$\cos\varphi=\frac{r}{z},$$

d'où

$$z=\frac{r}{\cos\varphi}=\frac{3}{0,8}=3,75 \text{ ohms}.$$

$$U=I\cdot z=6\cdot3,75=22,5 \text{ V}.$$

$$x_L = \sqrt{z^2 - r^2} = \sqrt{3,75^2 - 3^2} = \sqrt{14,06 - 9} = \sqrt{5,06} = 2,24 \text{ ohms.}$$

$$U_a = Ir = 6 \cdot 3 = 18 \text{ V.}$$

$$U_L = Ix_L = 6 \cdot 2,24 = 13,45 \text{ V.}$$

$$S = IU = 6 \cdot 22,5 = 135 \text{ VA.}$$

$$P = I^2 r = 36 \cdot 3 = 108 \text{ W}$$

ou

$$P = IU \cos \varphi = 6 \cdot 22,5 \cdot 0,8 = 108 \text{ W,}$$

$$Q = IU_L = 6 \cdot 13,45 = 81 \text{ VAr}$$

ou

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{135^2 - 108^2} = \sqrt{6561} = 81 \text{ VAr}$$

ou

$$Q = I^2 x_L = 6^2 \cdot 2,24 = 81 \text{ VAr.}$$

§ 100. NÉCESSITÉ D'AMÉLIORER LE FACTEUR DE PUISSANCE DES RÉCEPTEURS

Admettons qu'une centrale électrique soit équipée d'une génératrice monophasée de 240 kVA de puissance débitant sous une tension de 1200 V. Le courant que la génératrice peut fournir au réseau est :

$$I = \frac{S}{U} = \frac{240\,000}{1200} = 200 \text{ A.}$$

Considérons le cas où cette génératrice alimente une charge à résistance purement ohmique (appareils de chauffage, lampes à incandescence). Puisque dans ce cas toute la puissance fournie par la machine est une puissance active, le $\cos \varphi$ est égal à l'unité.

La puissance active de la génératrice :

$$P = IU \cos \varphi = 200 \cdot 1200 \cdot 1 = 240\,000 \text{ W} = 240 \text{ kW.}$$

Si, maintenant on connecte à la même génératrice une charge dont le $\cos \varphi = 0,8$ (résistance et réactance d'induction), la puissance active fournie au réseau est :

$$P = IU \cos \varphi = 200 \cdot 1200 \cdot 0,8 = 192\,000 \text{ W} = 192 \text{ kW.}$$

La génératrice ne sera pas chargée complètement en ce qui concerne la puissance active, bien que le même courant de 200 A circule dans son enroulement et l'échauffe. On ne peut pas porter le courant de la génératrice au-delà de 200 A, car cela présenterait un danger pour ses enroulements.

Pour une charge dont le $\cos\varphi = 0,5$, la génératrice fournit une puissance active :

$$P = IU \cos\varphi = 200 \cdot 1\,200 \cdot 0,5 = 120\,000 \text{ W} = 120 \text{ kW}.$$

On voit donc que plus le cos φ du récepteur est petit, plus la puissance active fournie par la génératrice sera petite, moins la génératrice sera chargée en ce qui concerne la puissance active et plus le rendement de la machine sera faible. Cela oblige à prendre en considération non seulement l'énergie active prise par le récepteur à la centrale, mais aussi l'énergie réactive. Pour cette raison, chez un abonné dont les récepteurs présentent une charge réactive, on doit disposer des compteurs de puissance active et de puissance réactive (leur fonctionnement et construction sont décrits dans le chapitre XIV). L'énergie active et l'énergie réactive, lorsque les puissances active et réactive sont constantes, peuvent être déterminées par les formules :

$$A_a = Pt \text{ kWh};$$
$$A_r = Qt \text{ kVAr}\cdot\text{h}.$$

Un faible cos φ du récepteur provoque :

1. *La nécessité d'augmenter la puissance apparente des centrales électriques et des transformateurs.*

D'après la formule :

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

on voit que

$$S = \frac{P}{\cos\varphi}.$$

Par exemple, lorsque la puissance des moteurs d'un atelier est de 80 kW et le cos φ du réseau de l'atelier est égal à 0,8, la puissance du transformateur nécessaire pour alimenter les moteurs sera :

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{80}{0,8} = 100 \text{ kVA}.$$

Si le cos φ du réseau de l'atelier tombe à 0,6 pour la même puissance des moteurs, la puissance requise du

transformateur sera :

$$S = \frac{80}{0,6} = 133 \text{ kVA}.$$

Si dans le premier cas on peut utiliser un transformateur de 100 kVA, dans le second, il faut prendre un transformateur qui suit le premier dans la gamme des puissances des transformateurs de série : celui de 180 kVA.

2. *La baisse du rendement des génératrices et des transformateurs.* Une génératrice ou un transformateur alimentant une charge à faible cos φ peuvent être chargés en courant sans être pour autant chargés en puissance active. Dans une machine sous-chargée, le rendement baisse, ce qui a pour résultat une dépense superflue de l'énergie des moteurs primaires (de la tourbe ou du charbon dans les centrales thermiques, du combustible liquide dans les moteurs à combustion interne, etc.).

3. *L'accroissement des pertes de puissance et de la tension dans les fils et l'accroissement de la section des fils.* La formule de la puissance du courant monophasé

$$P = IU \cos \varphi$$

nous donne

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}.$$

Ainsi, pour une puissance $P = 1$ kW, $\cos \varphi = 0,9$ et une tension $U = 200$ V, on a

$$I = \frac{1000}{200 \cdot 0,9} = 5,55 \text{ A}.$$

Mais pour un $\cos \varphi = 0,6$ on a

$$I = \frac{1000}{200 \cdot 0,6} = 8,35 \text{ A}.$$

On voit donc que pour les mêmes valeurs de la puissance et de la tension, la diminution du cos φ est accompagnée d'un accroissement du courant dans les fils et, par conséquent, d'un accroissement des pertes par échauffement (I^2r).

Afin de prévenir un échauffement dangereux lors de l'accroissement du courant, il faut augmenter la section des fils. De plus, l'accroissement du courant dans les fils lorsque leur section reste la même, provoque un accroissement de la chute de tension dans ces fils.

§ 101. CAUSES DÉTERMINANT LA VALEUR DU FACTEUR DE PUISSANCE DES RÉCEPTEURS ET PROCÉDÉS PRATIQUES D'AMÉLIORATION DU FACTEUR DE PUISSANCE

A. Causes d'un mauvais facteur de puissance. 1. *Charge insuffisante des moteurs à courant alternatif.* Lorsqu'un moteur électrique est sous-chargé, la puissance active qu'il absorbe diminue proportionnellement à la charge. En même temps, la puissance réactive varie dans un moindre degré. Pour cette raison, plus la charge du moteur est petite, plus son facteur de puissance est faible.

Par exemple, un moteur asynchrone de 400 kW tournant à 1000 tours/mn a un cos φ qui, en pleine charge, est de 0,83. Pour 3/4 de charge, le même moteur a un cos φ de 0,80. Pour 1/2 de charge, le cos φ est de 0,7 et pour 1/4 de charge, il est égal à 0,5.

Les moteurs tournant à vide ont un cos φ compris entre 0,1 et 0,3, suivant le type, la puissance et la vitesse de rotation.

2. *Choix incorrect du type de moteur.* Les moteurs rapides et ceux qui offrent une grande puissance ont un cos φ plus élevé que les moteurs lents et de faible puissance. Les moteurs fermés ont un cos φ inférieur à celui des moteurs ouverts. Les moteurs qui ont été choisis de façon incorrecte en ce qui concerne le type, la puissance ou la vitesse provoquent une diminution du cos φ.

3. *Élévation de la tension du réseau.* Pendant les heures creuses, les intervalles de midi, etc., la tension du réseau dans les usines augmente de plusieurs volts. Cela provoque un accroissement du courant magnétisant des récepteurs inductifs (de la composante réactive de leur courant total), ce qui produit à son tour une diminution du cos φ de l'usine.

4. *Réparation incorrecte du moteur.* Parfois, en effectuant le rebobinage des moteurs, les bobineurs choisissent les fils de façon incorrecte et, de ce fait, ne placent pas dans les encoches de la machine le nombre de conducteurs correspondant au nombre de fils qui se trouvaient dans le moteur lors de sa fabrication. Pendant la marche d'un tel moteur réparé le flux de fuites augmente, ce qui provoque une diminution du cos φ du moteur.

En cas d'une forte usure des paliers, le rotor du moteur peut toucher le stator. Au lieu de changer les paliers, le

personnel suit parfois une fausse voie et réduit le diamètre du rotor au tour.

L'accroissement de l'entrefer séparant le rotor et le stator provoque un accroissement du courant magnétisant et une diminution du cos φ du moteur.

B. Procédés pratiques d'amélioration du facteur de puissance. Tout ce que nous venons de dire prouve qu'il

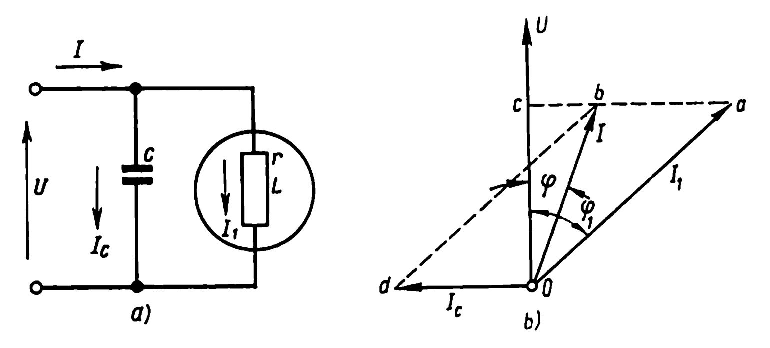


Fig. 174. Amélioration du cos φ à l'aide d'une batterie de condensateurs statiques:

a — schéma de branchement; b — diagramme vectoriel

faut faire tout pour avoir un cos φ élevé. On améliore ce dernier par les mesures suivantes:

1. Choix correct du type, de la puissance et de la vitesse des moteurs à installer.

2. Accroissement de la charge des moteurs.

3. Interdiction de faire marcher les moteurs à vide pendant un temps prolongé.

4. Réparation correcte des moteurs.

5. Emploi des condensateurs statiques.

Le faible poids, l'absence de parties tournantes, les faibles pertes d'énergie, la facilité d'entretien, la sécurité et la fiabilité permettent d'employer largement les condensateurs pour améliorer le cos φ des moteurs.

En choisissant convenablement la valeur de la capacité pour le couplage en parallèle de l'inductance et de la capa-

cité, on peut obtenir une diminution de l'angle de déphasage entre la tension et le courant total, les puissances active et réactive absorbées par les branches comportant l'inductance restant inchangées. On peut réduire cet angle à zéro. Le courant total parcourant la portion commune du circuit sera minimal et en phase avec la tension du réseau.

Ce procédé largement utilisé est appelé *compensation du déphasage* ou *compensation de facteur de puissance.*

Pour des raisons économiques, il n'est pas avantageux de réduire l'angle φ jusqu'à zéro, et il convient d'avoir un $\cos\varphi = 0{,}9$ à $0{,}95$.

Examinons le calcul de la capacité des condensateurs qu'il faut coupler en parallèle avec la charge inductive pour amener le $\cos\varphi$ à la valeur requise.

La figure 174, *a* montre le schéma de branchement d'une charge inductive sur le réseau à courant alternatif. Pour améliorer le facteur de puissance une batterie de condensateurs est branchée parallèlement au récepteur. On commence la construction du diagramme vectoriel par le vecteur de la tension U. Vu la nature inductive de la charge, le courant I_1 est déphasé de φ_1, en arrière sur la tension du réseau.

Il faut diminuer l'angle de déphasage entre la tension U et le courant total jusqu'à φ [1]).

Le tronçon *oc*, qui représente la composante active du courant I_1, est:

$$oc = I_1 \cos\varphi_1 \quad oa \cos\varphi_1 .$$

En utilisant la formule donnant la puissance en courant alternatif

$$P = UI \cos\varphi ,$$

on peut exprimer la droite *oc* comme suit:

$$oc = I_1 \cos\varphi_1 = \frac{P}{U} .$$

Le courant total I dans la portion commune du circuit est égal à la somme géométrique du courant de charge I_1 et du courant dans le condensateur I_C.

[1]) Autrement dit, il s'agit d'augmenter le facteur de puissance en le portant du $\cos\varphi_1$ à la valeur de $\cos\varphi$.

Des triangles *oac* et *obc* on tire :

$$ac = oc \operatorname{tg} \varphi_1 ;$$

$$bc = oc \operatorname{tg} \varphi.$$

En partant du diagramme, on obtient :

$$ab = od = ac - bc = oc \operatorname{tg} \varphi_1 - oc \operatorname{tg} \varphi = oc (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi).$$

Puisque $oc = \frac{P}{U}$ et $ab = I_C$, on a :

$$I_C = \frac{P}{U} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi).$$

Mais, comme nous avons déjà indiqué,

$$I_C = U\omega C.$$

Donc, en définitive : $C = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi)$.

Exemple 20. Les moteurs électriques d'une mine absorbent une puissance de 2000 kW sous une tension de 6 kV avec un $\cos \varphi_1 = 0{,}6$. Déterminer la capacité de la batterie de condensateurs à brancher sur les barres de l'installation pour augmenter le $\cos \varphi$ jusqu'à 0,9, la fréquence f étant de 50 Hz.

Solution.

$$\cos \varphi_1 = 0{,}6 ; \ \varphi_1 = 53°10' ; \ \operatorname{tg} \varphi_1 = 1{,}335 ;$$

$$\cos \varphi = 0{,}9 ; \ \varphi = 25°50' ; \ \operatorname{tg} \varphi = 0{,}484 ;$$

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 314 \frac{1}{s} ;$$

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi) = \frac{2\,000\,000}{314 \cdot 6000^2} (1{,}335 - 0{,}484) =$$

$$= 0{,}00015 \text{ F} = 150 \ \mu\text{F}.$$

Problèmes

1. Déterminer la fréquence du courant alternatif fournie par une génératrice comportant 24 pôles, dont le rotor fait 250 tr/mn.

2. Une génératrice à 20 pôles fournit un courant à fréquence de 50 Hz. Calculer le nombre de tours par minute du rotor de cette génératrice.

3. Déterminer le nombre de pôles d'une génératrice à courant alternatif dont la vitesse de rotation est de 300 tr/mn et la fréquence est de 50 Hz.

4. Une bobine est branchée dans un circuit à courant alternatif monophasé de 120 V ; la F.É.M. d'auto-induction est égale à 100 V. Quelle est la chute de tension active ?

5. Quelle sera l'indication d'un voltmètre branché aux bornes d'un électro-aimant si la réactance d'induction de l'enroulement est égale à 6 ohms, la résistance ohmique est de 8 ohms et le courant parcourant l'enroulement est de 5 A ?

6. Lorsqu'on a branché une bobine sur le réseau à courant continu de 120 V, l'ampèremètre a indiqué un courant de 4 A. Lorsque la même bobine a été branchée sur un réseau à courant alternatif de 380 V, l'ampèremètre a indiqué 5 A. Calculer l'impédance, la résistance ohmique et la réactance de la bobine.

7. Deux conducteurs à résistance ohmique de 6 ohms et de 5 ohms et à réactances d'induction de 3 et de 8 ohms respectivement sont mis en série. Quelle tension doit-on appliquer pour que le circuit soit parcouru par un courant de 4 A ?

8. Un conducteur dont la résistance ohmique est de 7 ohms et la réactance d'induction de 5 ohms est parcouru par un courant de 6 A. Parallèlement au premier conducteur est branché un second conducteur dont la résistance $r = 2$ ohms et $x_L = 4$ ohms. Calculer le courant dans le second conducteur.

9. Un moteur monophasé branché sur un réseau de 120 V absorbe un courant de 2 A. Le facteur de puissance du moteur est de 0,85. Calculer la puissance active et la puissance apparente absorbées par le moteur.

10. Sur un tableau de distribution sont montés trois appareils: un ampèremètre, un voltmètre et un wattmètre. L'ampèremètre indique 40 A, le voltmètre 110 V et le wattmètre 4 kW. Calculer z, r, x_L, S, $\cos \varphi$, Q, U_L et U_a en sachant que la charge est inductive.

11. Déterminer le courant absorbé par un moteur monophasé de 5 kW branché sur un réseau de 120 V, son facteur de puissance étant de 0,8.

12. Soit une usine électrique équipée d'un alternateur monophasé de 200 kVA, 100 V. Calculer la puissance active fournie par l'alternateur au réseau avec les facteurs de puissance suivants: 1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2.

13. Une bobine d'inductance dont le $\cos \varphi = 0,3$ est traversée par un courant alternatif de 10 A. Le wattmètre mesurant la puissance de la bobine indique 250 W. Calculer la tension aux bornes de la bobine, son impédance, sa résistance ohmique et sa réactance.

14. Une bobine d'inductance branchée sur un réseau à courant continu de 12 V absorbe un courant de 8 A. La bobine absorbe le même courant étant branchée sur un réseau à courant alternatif de 20 V. Calculer la résistance ohmique, la réactance et l'impédance de la bobine ainsi que les puissances apparente, active et réactive.

15. L'ampèremètre indique 20 A, le voltmètre — 120 V et le phasemètre — 0,8. Calculer S, P, Q, z, r, x_L, U_L et U_a.

16. La puissance utile développée sur l'arbre d'un moteur monophasé est de 10 ch, le rendement du moteur est de 85 %, le $\cos \varphi$ de 0,8 et la tension de 220 V. Calculer la puissance de la génératrice alimentant ce moteur si l'énergie est transmise par une ligne longue de 50 m utilisant des fils de cuivre de 16 mm^2. On peut négliger la réactance d'induction des fils de la ligne.

17. L'ampèremètre indique 8 A, le voltmètre — 220 V, la résistance ohmique de la bobine est de 15 ohms. Calculer P, S, Q, z, x_L, $\cos \varphi$, U_L et U_a du récepteur.

18. Sur la plaque signalétique d'un moteur monophasé on lit: $U = 120$ V, $I = 5$ A, $\cos\varphi = 0,8$. Calculer la résistance ohmique, la réactance et l'impédance de l'enroulement du moteur.

19. Une bobine comportant un noyau d'acier doux est branchée sur un réseau monophasé. Dans le circuit de la bobine sont branchés les appareils suivants: un voltmètre, un ampèremètre et un wattmètre. L'ampèremètre indique 5 A, le voltmètre — 120 V et le wattmètre — 200 W. La résistance ohmique de la bobine est de 2 ohms. Calculer le facteur de puissance de la bobine, la valeur de la F.É.M. d'auto-induction, la perte de puissance dans l'enroulement et dans le noyau de la bobine.

20. Une bobine à noyau de fer ayant le facteur de puissance de 0,2 et branchée sur un réseau de 60 V absorbe un courant de 3 A. Sa résistance ohmique est de 2 ohms. Quelles sont la F.É.M. induite dans la bobine, les pertes de puissance dans l'enroulement et dans le noyau.

Questions de contrôle

1. Comment obtient-on le courant alternatif ?
2. Comment définit-on la période et la fréquence d'un courant alternatif ?
3. Comment peut-on déterminer la fréquence lorsqu'on connaît le nombre de pôles et la vitesse du rotor d'une génératrice à courant alternatif ?
4. Quelles sont les effets d'un courant alternatif ?
5. Comment se manifeste l'effet d'une inductance branchée dans un circuit à courant alternatif ?
6. Qu'est-ce que la résistance ohmique? La réactance d'induction ?
7. Qu'entend-on par facteur de puissance ?
8. Comment mesure-t-on la puissance active et la puissance apparente d'un courant alternatif ?
9. Comment se manifeste une capacité insérée dans un circuit à courant alternatif ?
10. Quels sont les moyens utilisés pour améliorer le $\cos\varphi$?
11. Qu'est-ce que la valeur efficace d'un courant alternatif ?
12. Qu'entend-on par la résonance de tension?
13. Qu'est-ce que la résonance de courants?

CHAPITRE VIII

COURANT TRIPHASÉ

§ 102. COURANTS POLYPHASÉS

On appelle *système polyphasé* l'ensemble de F.É.M. alternatives (de courants, de tensions, etc.) ayant la même fréquence, mais déphasées l'une par rapport à l'autre d'un certain angle. Si les amplitudes de différentes F.É.M. sont égales et les F.É.M. sont déphasées l'une par rapport à l'autre d'un angle égal à $\frac{2\pi}{m}$ (où m est le nombre de phases), un tel système est appelé *système polyphasé symétrique*.

Chaque F.É.M. peut agir dans son circuit indépendant et ne pas être liée aux autres F.É.M. Un tel système est dit système *non lié*.

Un circuit monophasé faisant partie d'un système polyphasé donné est appelé *phase*. Les phases d'un système non lié ne sont pas liées électriquement ou magnétiquement entre elles; lors du fonctionnement elles ne dépendent pas l'une de l'autre et on peut les calculer par les formules utilisées pour le calcul des circuits à courant monophasé.

Un système polyphasé non lié a l'inconvénient d'exiger un grand nombre de fils égal à $2m$. Par exemple, pour le transport d'énergie par un système triphasé non lié on a besoin de six fils.

Un système polyphasé dont les phases sont électriquement liées l'une à l'autre est appelé *système polyphasé lié*. Les systèmes liés sont largement employés.

Le courant polyphasé présente de grands avantages: pour la transmission de la même puissance par un courant polyphasé la section des fils peut être beaucoup plus petite qu'avec le courant monophasé; à l'aide de bobines ou d'enroulements immobiles il crée un champ magnétique tournant utilisé dans les moteurs et dans divers appareils à courant alternatif.

§ 103. COURANT TRIPHASÉ

Parmi les systèmes de courants polyphasés c'est le courant triphasé qui est le plus répandu.

Le courant triphasé est obtenu comme suit. Lorsque dans un champ magnétique uniforme créé par les pôles *NS* (fig. 175) on place trois spires disposées chacune sous un angle de 120° par rapport à l'autre et si on fait tourner ces

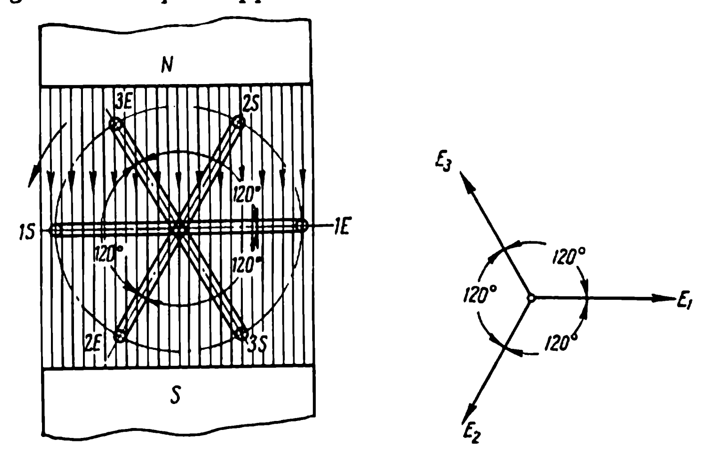


Fig. 175. Rotation des spires dans un champ magnétique uniforme

spires à une vitesse angulaire constante, elles sont le siège des F.É.M. induites qui sont également déphasées de 120°. Si l'on admet que la phase initiale de la première spire soit nulle, les F.É.M. dans les spires seront exprimées par les équations suivantes:

$$e_1 = E_{m1} \sin \omega t;$$

$$e_2 = E_{m2} \sin (\omega t - 120°);$$

$$e_3 = E_{m3} \sin (\omega t - 240°).$$

La figure 175 (à droite) présente le diagramme vectoriel des F.É.M. des trois spires. Comme nous avons déjà dit, la longueur des vecteurs est égale à la valeur efficace des F.É.M. En pratique, pour obtenir un courant triphasé on monte sur le stator de la génératrice trois enroulements décalés de 120° l'un par rapport à l'autre. Ils sont appelés *enroulements de phase* ou tout simplement *phases de la génératrice*.

A gauche de la figure 176 est représentée schématiquement une génératrice bipolaire de courant triphasé. Le stator de la machine comporte trois enroulements comportant le même nombre de spires et décalés de 120° (pour une machine bipolaire). Les lettres A, B et C désignent les entrées des enroulements et les lettres X, Y et Z leurs sorties. Le champ magnétique est produit par l'enroulement monté

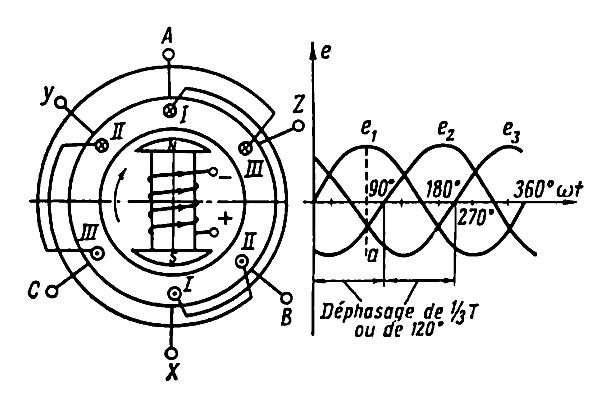


Fig. 176. Production de courant triphasé

sur le rotor. Par l'intermédiaire des balais et des bagues on applique aux extrémités de cet enroulement une tension continue provenant d'une génératrice à courant continu spéciale ou d'un redresseur. Le rotor de la génératrice est actionné par un moteur primaire (une turbine à vapeur, une turbine hydraulique, un moteur à combustion interne, etc.), son champ magnétique coupe les enroulements statoriques et induit dans ces derniers des F.É.M. sinusoïdales.

Sur la même figure, à droite, on voit les courbes représentant la variation des F.É.M. induites dans les trois enroulements. La position dans laquelle est représenté le rotor dans la partie gauche de la figure est montrée dans la partie droite en pointillé ae_1. A cet instant, la bobine *I* se trouve au-dessus des milieux des pôles de l'électro-aimant, la valeur de la F.É.M. induite dans cette bobine est maximale et la F.É.M. est dirigée, selon la règle de la main droite, de la sortie de la bobine vers son entrée. La F.É.M. de la bobine *II* est déphasée en arrière de 1/3 de période par rapport à la F.É.M. de la bobine *I* et la F.É.M. de la bobi-

ne *III* retarde sur la F.É.M. de la bobine *II* aussi de 1/3 de période.

Les bobines *II* et *III* se trouvent dans la zone d'action du pôle sud de l'électro-aimant du rotor et, de ce fait, les F.É.M. induites dans ces bobines sont dirigées de leurs entrées vers leurs sorties.

On peut obtenir trois sinusoïdes, analogues à celles indiquées sur la figure 176, en faisant tourner trois vecteurs

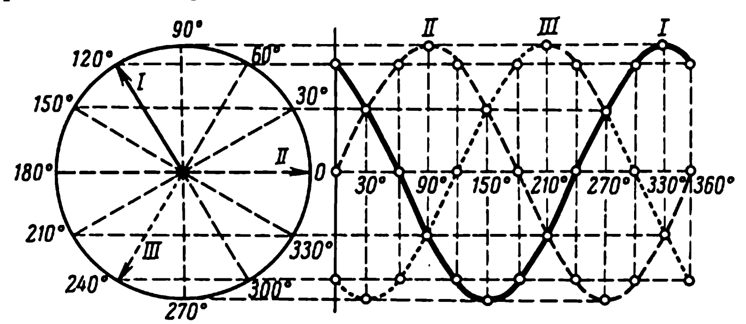


Fig. 177. Construction de trois sinusoïdes déphasées de 120° par rotation de trois vecteurs décalés de 120°

représentant, à l'échelle choisie, la valeur maximale de la F.É.M. dans les bobines du stator et décalés de 120° l'un par rapport à l'autre (fig. 177).

Tout ce que nous venons de dire sur les forces électromotrices est valable aussi pour les courants et les tensions. Conformément à la définition générale donnée plus haut, notons que le système de trois F.É.M. alternatives de même fréquence et de même amplitude, déphasées l'une par rapport à l'autre de 120° $\left(\frac{2\pi}{3}\right)$, est appelé *système triphasé symétrique*.

Les enroulements de phases de la génératrice comportent le même nombre de spires et sont confectionnées en fils de même section. Les F.É.M. induites dans ces enroulements seront égales en grandeur. Si chacune des trois phases de la génératrice débite sur une charge indépendante (fig. 178), on aura un système triphasé non lié. Dans ce cas, la génératrice est liée au récepteur par six fils. D'après la loi d'Ohm le courant traversant une phase est:

$$I_{ph} = \frac{U_{ph}}{z_{ph}},$$

où I_{ph} est le courant de phase (simple);
U_{ph} est la tension de l'enroulement de phase de la génératrice;
z_{ph} est l'impédance d'une phase du récepteur.

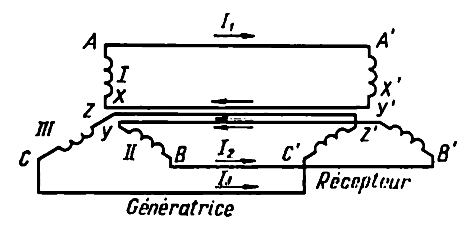


Fig. 178. Système triphasé à six fils

Les systèmes non liés à courant triphasé ne sont pas utilisés.

Les enroulements de phase des génératrices et des récepteurs de courant triphasé (moteurs, transformateurs, etc.) sont montés soit en étoile, soit en triangle.

§ 104. MONTAGE EN ÉTOILE

Lorsque les enroulements de phase d'une génératrice ou d'un récepteur sont connectés de façon que les sorties des enroulements soient réunies en un point commun et les entrées des enroulements soient reliées aux fils de ligne, on a un montage appelé montage *en étoile* et désigné par le signe Y. Sur la figure 179, les enroulements de la génératrice et ceux du récepteur sont couplés en étoile. Les points où sont réunies les sorties des enroulements de phase de la génératrice ou du récepteur sont appelés respectivement *points neutres* de la génératrice (0) et du récepteur (0'). Les deux points 0 et 0' sont réunis par un fil appelé *fil neutre*. Les trois fils restants du système triphasé venant de la génératrice au récepteur sont appelés *fils de ligne*. La génératrice est ainsi liée au récepteur par quatre fils. Un tel système est appelé système triphasé à quatre fils.

En comparant le système triphasé non lié (fig. 178) au système triphasé à quatre fils (fig. 179), on remarque que dans le premier cas la fonction du fil de retour est remplie par trois fils du système tandis que dans le second cas, par le fil neutre uniquement. Lors du fonctionnement du système, le fil neutre est parcouru par un courant égal

à la somme géométrique des trois courants: I_A, I_B et I_C c.-à-d. que $\overline{I}_0 = \overline{I}_A + \overline{I}_B + \overline{I}_C$.

Les tensions mesurées entre les entrées des phases de la génératrice ou du récepteur et le point neutre ou le fil neutre sont appelées tensions *entre neutre et phase* ou *tensions simples* et sont désignées par U_A, U_B, U_C ou, sous la forme générale, U_{ph}. Très souvent, on donne les valeurs des F.É.M. des enroulements de phase d'une génératrice. Elles sont désignées par E_A, E_B, E_C ou E_{ph}.

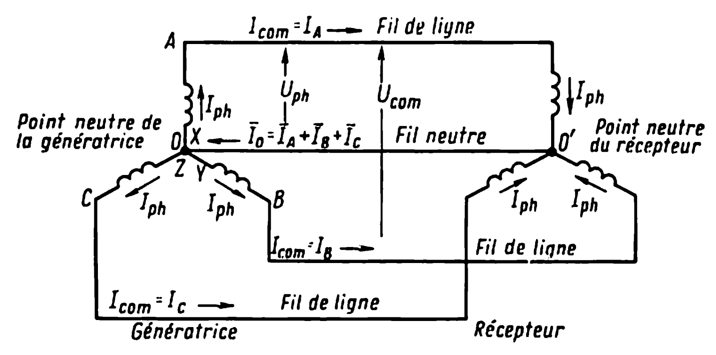


Fig. 179. Système triphasé à quatre fils

Si l'on néglige les résistances des enroulements de la génératrice, on peut écrire:

$$E_A = U_A\,;\; E_B = U_B\,;\; E_C = U_C\,;\; E_{ph} = U_{ph}.$$

Les tensions mesurées entre les entrées des phases A et B, B et C, C et A de la génératrice ou du récepteur sont appelées *tensions entre fils principaux* ou *tensions composées* et sont désignées par U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} ou, sous la forme générale, U_{com}. Les flèches sur la figure 179 indiquent le sens positif choisi du courant qui, dans les fils de ligne, va de la génératrice au récepteur et dans le fil neutre, du récepteur à la génératrice.

Un voltmètre connecté aux points A et B indique la tension composée U_{AB}. Puisque les sens positifs des tensions simples U_A, U_B et U_C ont été choisis à partir des entrées des enroulements de phase vers leurs sorties, le vecteur de la tension composée U_{AB} est égal à la différence géométrique des vecteurs des tensions simples U_A et U_B:

$$\overline{U}_{AB} = \overline{U}_A - \overline{U}_B.$$

Par analogie on peut écrire :

$$\overline{U}_{BC} = \overline{U}_B - \overline{U}_C ;$$
$$\overline{U}_{CA} = \overline{U}_C - \overline{U}_A .$$

On peut donc dire que la valeur instantanée de la tension composée est égale à la différence des valeurs instantanées des tensions simples correspondantes. Sur la figure 180, la soustraction des vecteurs est remplacée par la composition des vecteurs :

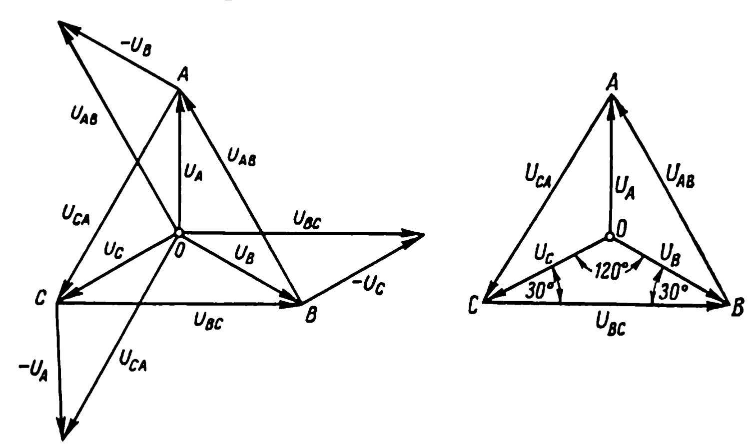


Fig. 180. Tensions simples et composées dans un montage en étoile

Fig. 181. Relation entre les tensions simples et les tensions composées dans un montage en étoile

$$U_A \text{ et } -U_B ; \; U_B \text{ et } -U_C ; \; U_C \text{ et } -U_A .$$

Le diagramme vectoriel montre que les vecteurs des tensions composées forment un triangle fermé.

La relation qui existe entre la tension composée et la tension simple est indiquée sur la figure 181 :

$$U_{BC} = 2U_B \cos 30°,$$

mais puisque $\cos 30° = \frac{\sqrt{3}}{2}$, on a :

$$U_{BC} = \sqrt{3} U_B$$

ou, en général,

$$U_{\text{com}} = \sqrt{3} U_{\text{ph}} .$$

Il en résulte que dans le montage en étoile la tension composée est égale à $\sqrt{3}$ fois la tension simple.

Dorénavant, en parlant de la tension dans les circuits triphasés, nous aurons en vue la tension composée, excepté les cas où il en sera stipulé autrement.

Le courant traversant l'enroulement de phase d'une génératrice ou d'un récepteur est appelé *courant simple* et est désigné, sous sa forme générale, par I_{ph}. Le courant traversant le fil de ligne est appelé *courant composé* et est désigné, sous sa forme générale, par I_{com}.

On voit sur la figure 179 que dans un montage en étoile le courant composé est égal au courant simple, c'est-à-dire que $I_{\text{com}} = I_{\text{ph}}$.

Considérons le cas où la charge des phases du récepteur est la même en grandeur et de même nature. Une telle charge est appelée *équilibrée* ou *symétrique*. Cette condition est exprimée par l'égalité:

$$z_1 = z_2 = z_3.$$

La charge ne sera pas équilibrée si $z_1 = r_1 = 5$ ohms; $z_2 = \omega L_2 = 5$ ohms et $z_3 = \frac{1}{\omega C_3} = 5$ ohms, car une seule des conditions est réalisée: celle de l'égalité des résistances des phases du récepteur en grandeur, tandis que la nature des résistances n'est pas la même (R_1 est une résistance ohmique, $x_2 = \omega L_2$ est une réactance d'induction, et $x_3 = \frac{1}{\omega C_3}$ est une réactance de capacité).

$$I_A = \frac{U_A}{z_A}; \quad I_B = \frac{U_B}{z_B}; \quad I_C = \frac{U_C}{z_C};$$

$$I_A = I_B = I_C.$$

Etant donné l'égalité des résistances et l'identité de leur nature, les facteurs de puissance des phases seront les mêmes:

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_A}{z_A}; \quad \cos \varphi_2 = \frac{r_B}{z_B}; \quad \cos \varphi_3 = \frac{r_C}{z_C};$$

$$\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = \cos \varphi_3.$$

En supposant que la résistance des fils reliant la génératrice au récepteur (fils de ligne) soit nulle, la tension aux bornes du récepteur sera égale à la tension aux bornes de la génératrice. En ajoutant à la tension de la génératrice la

chute de tension dans ses enroulements de phase, on obtient les F.É.M. simples de la génératrice.

La figure 182 donne un diagramme vectoriel des courants, des tensions et des F.É.M. pour le montage en étoile.

Nous savons que le fil neutre doit être parcouru par un courant égal à la somme géométrique des courants de toutes les trois phases. La figure 183 montre les courbes

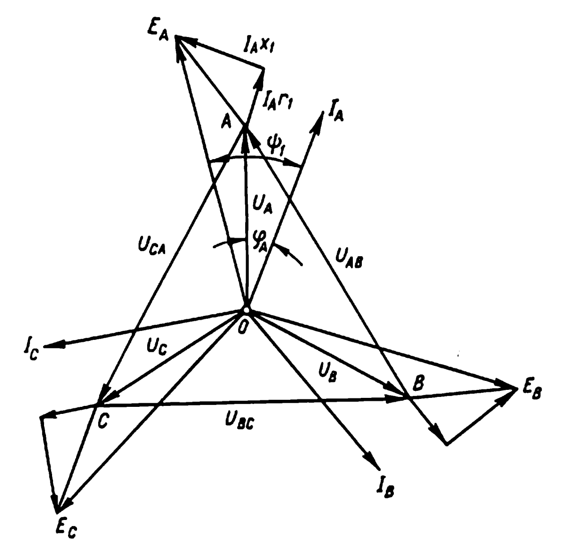


Fig. 182. Diagramme vectoriel des courants et des tensions dans un montage en étoile

représentant la variation des courants pour le cas d'une charge équilibrée du système triphasé. Puisque la charge est équilibrée, les valeurs maximales de toutes les trois sinusoïdes du courant sont les mêmes.

Examinons l'instant a, et pour obtenir la valeur de courant dans le fil neutre, prenons la somme des valeurs instantanées des courants des trois phases. A cet instant, le courant de la troisième phase i_3 est nul. La valeur instantanée du courant dans la première phase est égale à i_1 et ce courant est dirigé dans un sens. Le courant dans la deuxième phase à cet instant est égal à i_2, mais est dirigé dans le sens inverse. Puisque les courants i_1 et i_2 sont égaux en grandeur, mais sont de sens opposés, et le courant i_3 est nul, la somme de tous les courants est aussi nulle.

La somme des trois courants est également nulle à l'instant *c*.

A l'instant *b*, le courant de la première phase atteint sa valeur positive maximale i_1. Au même moment, les courants des deuxième et troisième phases i_2 et i_3 sont égaux

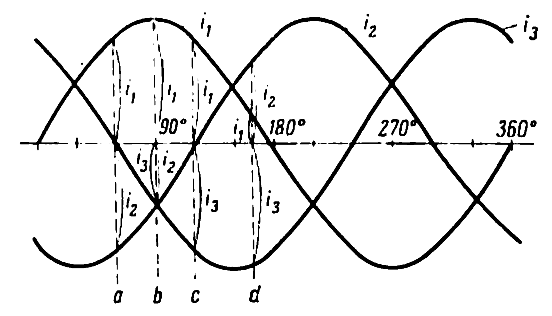


Fig. 183. Détermination du courant dans le fil neutre dans un système à toutes les trois phases uniformément chargées

et leur somme est égale et opposée au courant i_1. La somme des trois courants est donc de nouveau égale à zéro.

En examinant tout autre instant, on voit que pour une charge équilibrée la somme des valeurs instantanées des courants d'un système triphasé est nulle. Le courant dans

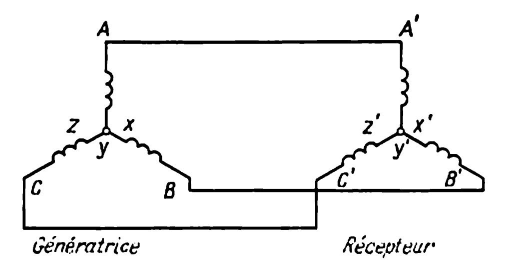


Fig. 184. Système triphasé à trois fils

le fil neutre est donc nul. En éliminant le fil neutre du système à quatre fils on passe au système à trois fils du courant triphasé représenté schématiquement par la figure 184. De cette façon, lorsqu'on a une charge équilibrée, par exemple, des moteurs triphasés, des fours triphasés, etc., on amène à une telle charge seulement trois fils.

Les récepteurs montés en étoile avec une charge non équilibrée des phases nécessitent un fil neutre. De tels récepteurs, par exemple, une charge constituée par des lampes d'éclairage, exigent quatre fils.

Exemple 1. Soit un récepteur dont les impédances des phases sont: $z_A = 5$ ohms, $z_B = 10$ ohms et $z_C = 20$ ohms. Le récepteur monté en étoile est branché sur un réseau de 380 V. Calculer le courant dans le fil neutre si les facteurs de puissance des phases sont les mêmes et la nature de la charge des différentes phases est aussi la même.

Solution.

Calculons les courants simples:

$$I_A = \frac{U_A}{z_A} = \frac{380}{\sqrt{3}\cdot 5} = \frac{220}{5} = 44 \text{ A};$$

$$I_B = \frac{U_B}{z_B} = \frac{220}{10} = 22 \text{ A};$$

$$I_C = \frac{U_C}{z_C} = \frac{220}{20} = 11 \text{ A}.$$

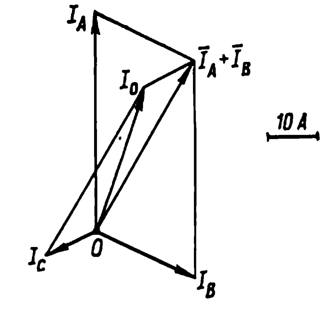


Fig. 185. Détermination du courant dans le fil neutre par méthode géométrique

Puisque les courants sont déphasés de 120°, pour construire le diagramme vectoriel, traçons d'un point trois droites décalées de 120° l'une par rapport à l'autre (fig. 185). Sur ces droites, portons, à l'échelle choisie, les valeurs des courants I_A, I_B, I_C.

En composant géométriquement les courants simples, on obtient le courant dans le fil neutre I_0. Dans le cas considéré, ce courant est égal à 31 A.

Les vecteurs des F.É.M. des enroulements d'une génératrice représentent un système symétrique: ils sont égaux en grandeur et déphasés de 120° l'un par rapport à l'autre.

Sur le diagramme vectoriel le point neutre d'une génératrice se trouve au centre de l'étoile des F.É.M. simples. Le point neutre d'un récepteur monté en étoile présentant une charge équilibrée, ainsi qu'en cas de charge déséquilibrée, mais en présence d'un fil neutre ayant une résistance suffisamment petite, se trouve au centre de gravité du triangle des tensions composées. La coupure du fil neutre pendant le fonctionnement d'un récepteur triphasé à phases inégalement chargées provoque une nouvelle répartition des courants et des tensions. Nous allons examiner cette question de façon plus détaillée.

Soit un récepteur triphasé (fig. 186, *a*) dont la charge active des phases n'est pas équilibrée. Admettons que le rapport des résistances des phases du récepteur est égal à $r_A : r_B : r_C = 1 : 2 : 3$. Déterminons la position du point neutre du récepteur.

En cas de mise en court-circuit de la phase A (fig. 186, *b*) ($r_A = 0$), le point neutre $0'$ se confondra avec le point A du

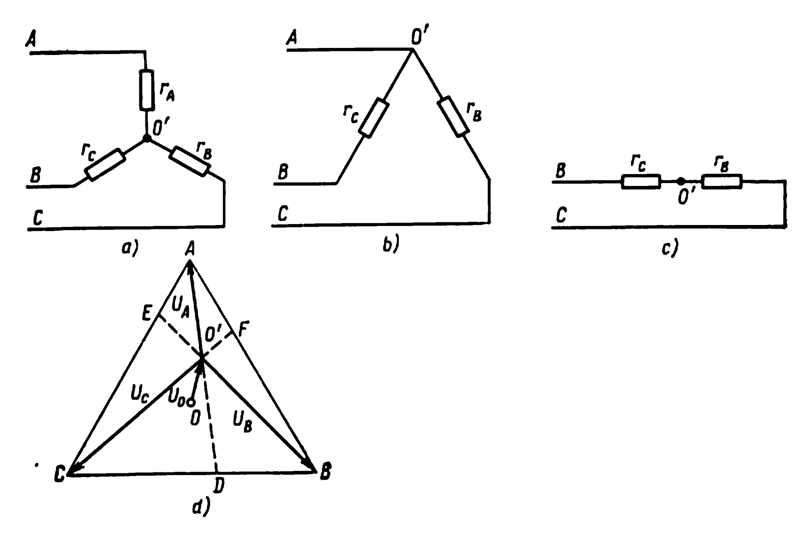


Fig. 186. Détermination de la position du point neutre du récepteur

diagramme vectoriel. La tension des deux autres phases B et C deviendra alors $\sqrt{3}$ fois plus grande parce qu'elles seront branchées entre les fils de ligne. En cas de coupure de la phase A ($r_A = \infty$), les résistances des phases r_B et r_C seront branchées en série entre les fils de ligne B et C (fig. 186, *c*). Le point neutre du récepteur se trouvera sur le côté BC du triangle des tensions composées au point D, qui divise le côté BC dans le rapport $r_B : r_C = 2 : 3$. On peut démontrer que lorsque la résistance de la phase A passe de $r_A = 0$ à $r_A = \infty$, le point neutre du récepteur se déplace suivant la ligne reliant les points A et D.

Si on raisonne de la même façon pour la phase B et ensuite pour la phase C on obtient encore deux lignes:

une ligne BE obtenue par suite du court-circuit et de la coupure de la phase B, et une autre ligne CF obtenue par suite du court-circuit et de la coupure de la phase C. La ligne BE divise le côté AC du triangle dans le rapport $r_A : r_C = 1 : 3$. La ligne CF divise le côté AB du triangle dans le rapport $r_A : r_B = 1 : 2$.

Le point d'intersection des droites AD, BE et CF est le point neutre du récepteur $0'$ pour la charge donnée (fig. 186, *d*).

Il est évident que pour déterminer la position du point neutre il suffit d'examiner les cas de court-circuit et de coupure de deux phases quelconques.

Les vecteurs $\overline{O'A}$, $\overline{O'B}$, $\overline{O'C}$ représentent les tensions aux phases du récepteur. On voit d'après le diagramme que pour une charge déséquilibrée, les tensions simples du récepteur ne sont pas les mêmes et la valeur de la tension simple est proportionnelle à la résistance de la phase.

Le déplacement du point neutre du récepteur qui se produit à cause d'une charge déséquilibrée aboutit à un phénomène indésirable dans le réseau d'éclairage. Plus le nombre et la puissance des lampes branchées sur cette phase sont grands et plus leur résistance sera faible, plus leur tension simple sera donc petite et moins leur éclat sera intense.

Le point neutre d'une étoile du récepteur peut se trouver à l'intérieur du triangle des tensions composées, coïncider avec l'un de ses sommets, se trouver sur l'un de ses côtés et, dans certains cas, peut être situé hors du triangle.

Lors d'une charge déséquilibrée entre les points neutres de la génératrice et du récepteur il existe une différence de potentiel $00' = U_0$ (tension de déplacement du point neutre).

Nous avons examiné les phénomènes ayant lieu lors d'un déséquilibre des phases du récepteur monté en étoile sans fil neutre. Lorsque le fil neutre existe, tous les défauts provoqués par les charges inégales des phases disparaîssent. Une charge comprenant des lampes d'éclairage et branchée en étoile exige toujours la présence d'un fil neutre, car même une charge équilibrée des phases à un certain moment ne garantit pas l'existence de cet équilibre pendant un temps prolongé.

§ 105. MONTAGE EN TRIANGLE

Les génératrices et les récepteurs de courant triphasé peuvent aussi être couplés en triangle.

La figure 187 représente un système triphasé non lié. En liant deux par deux les fils d'un système non lié à six

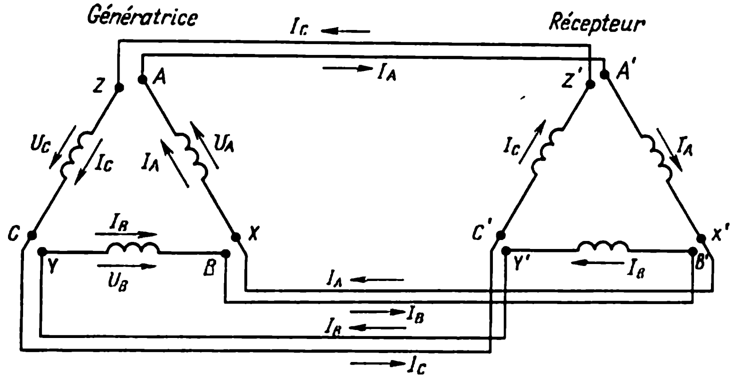


Fig. 187. Système triphasé non lié

fils et en connectant les phases, on passe à un système triphasé à trois fils monté en triangle.

Comme on le voit sur la figure 188, le montage en triangle se fait de façon que la sortie de la phase A soit

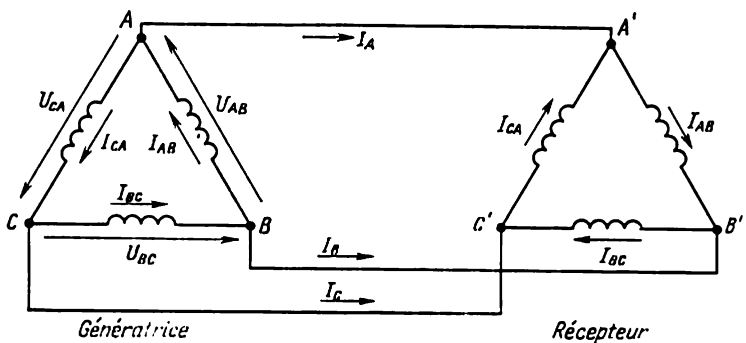


Fig. 188. Système triphasé lié couplé en triangle

connectée à l'entrée de la phase B, la sortie de la phase B soit connectée à l'entrée de la phase C et la sortie de la phase C à l'entrée de la phase A. Les fils des lignes sont reliés aux points de connexion des phases.

Si les enroulements d'une génératrice sont couplés en triangle, chaque enroulement de phase crée une tension composée (fig. 188). Pour un récepteur couplé en triangle,

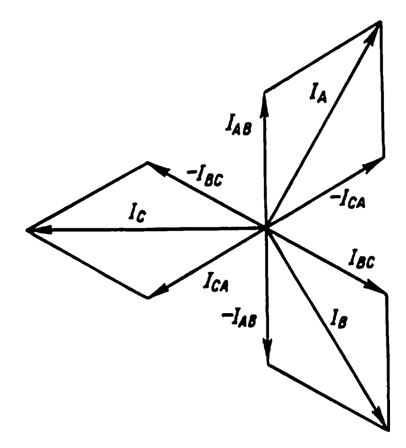


Fig. 189. Courants simples et composés dans un montage en triangle

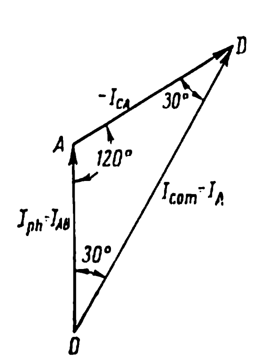


Fig. 190. Relation entre les courants simples et les courants composés dans un montage en triangle

la tension composée est appliquée aux bornes de la résistance de phase. Il en découle que dans le montage en triangle, la tension simple est égale à la tension composée:

$$U_{\text{com}} = U_{\text{ph}}.$$

Déterminons la relation entre les courants simples et les courants composés pour le montage en triangle si la charge des phases est la même en valeur et en nature. Ecrivons les équations des courants d'après la première loi de Kirchhoff pour les trois sommets A', B', C' du récepteur:

$$\bar{I}_A + \bar{I}_{CA} = \bar{I}_{AB};$$

$$\bar{I}_B + \bar{I}_{AB} = \bar{I}_{BC};$$

$$\bar{I}_C + \bar{I}_{BC} = \bar{I}_{CA};$$

d'où

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA};$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB};$$

$$\bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}.$$

On voit donc que les courants composés sont égaux à la différence géométrique des courants simples. Pour une charge équilibrée les courants simples ont la même valeur et sont déphasés l'un par rapport à l'autre de 120°. En faisant la soustraction des vecteurs des courants simples selon les

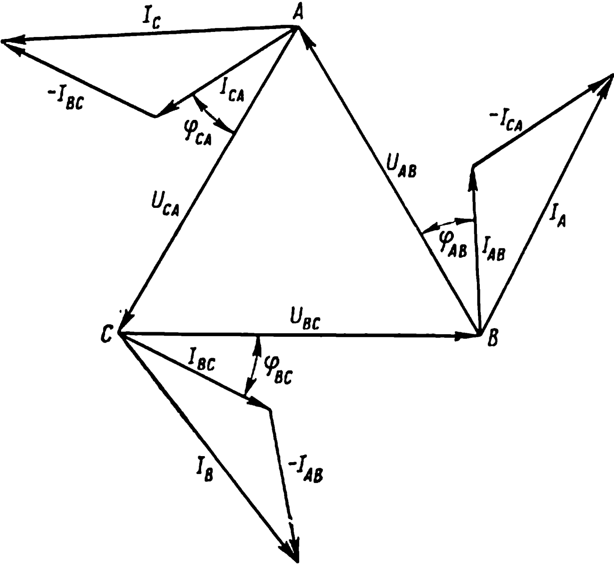


Fig. 191. Diagramme vectoriel des courants et des tensions pour une charge équilibrée couplée en triangle

équations obtenues, on obtient les courants composés (fig. 189). La relation entre les courants simples et les courants composés dans le montage en triangle est indiquée sur la figure 190.

$$I_{com} = 2I_{ph} \cos 30°.$$

Mais, puisque

$$\cos 30° = \frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$I_{com} = 2I_{ph}\frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}\, I_{ph}.$$

Il en résulte que pour une charge équilibrée montée en triangle, le courant composé est égal à $\sqrt{3}$ fois le courant simple.

La figure 191 montre le diagramme vectoriel des courants et des tensions pour une charge équilibrée active et inductive montée en triangle. La construction du diagramme se fait de la façon suivante. On construit à l'échelle choisie un triangle équilatéral des tensions composées du réseau U_{AB}, U_{BC} et U_{AC} qui sont égales aux tensions simples du récepteur. Dans le sens de décalage sous des angles φ_{AB}, φ_{BC} et φ_{AC} par rapport aux tensions composées U_{AB}, U_{BC} et U_{CA}, on construit à l'échelle choisie les vecteurs des courants simples I_{AB}, I_{BC} et I_{CA}.

Ensuite on détermine comme il a été déjà indiqué les courants composés I_A, I_B et I_C.

Exemple 2. La tension composée appliquée à un moteur triphasé est égale à 220 V. L'impédance z de l'enroulement du moteur est égale

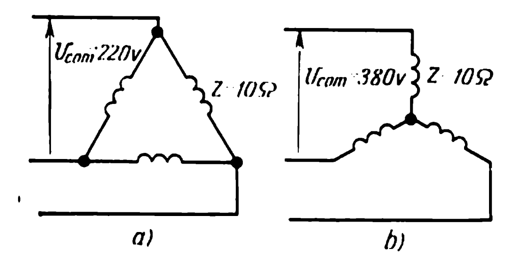


Fig. 192. Schéma pour l'exemple 2

à 10 ohms. Calculer les courants dans les fils de ligne et dans l'enroulement du moteur si ce dernier est monté en triangle (fig. 192, *a*).

D'après la loi d'Ohm:

$$I_{ph} = \frac{U_{ph}}{z} .$$

Puisque dans le montage en triangle $U_{com} = U_{ph}$, on a:

$$I_{ph} = \frac{220}{10} = 22 \text{ A}.$$

L'isolation de la phase du moteur est prévue pour une tension de 220 V et la section de l'enroulement de phase est prévue pour un échauffement provoqué par un courant de 22 A.

Dans le montage en triangle: $I_{com} = I_{ph} \cdot \sqrt{3}$, c'est-à-dire que $I_{com} = 22 \cdot \sqrt{3} = 22 \cdot 1{,}73 = 38$ A.

Le même moteur peut être branché sur une tension composée de 380 V, si ses enroulements sont montés en étoile (fig. 192, *b*).

Dans un montage en étoile, la tension simple est 1,73 fois plus petite que la tension composée, car $U_{com} = U_{ph} \cdot \sqrt{3}$.

Dans ce cas, on aura donc par phase du moteur:

$$U_{ph} = \frac{U_{com}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ V},$$

c'est-à-dire que la tension d'un enroulement de phase du moteur reste toujours égale à 220 V.

Le courant dans l'enroulement d'une phase reste le même:

$$I_{ph} = \frac{220}{10} = 22 \text{ A}.$$

En général, dans les moteurs et les autres récepteurs de courant triphasé, on fait sortir à l'extérieur toutes les

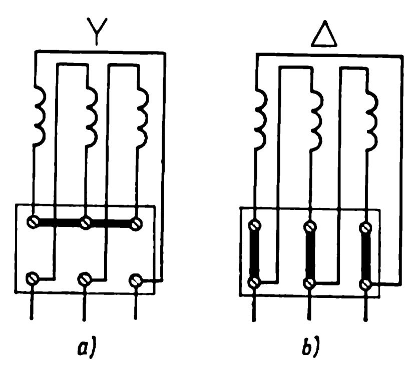


Fig. 193. Connexion des extrémités des enroulements sur la plaque à bornes d'une machine triphasée

six extrémités des trois enroulements que l'on peut coupler soit en étoile, soit en triangle. Généralement, une machine triphasée comporte une plaque à bornes en matériau isolant à laquelle aboutissent les six sorties.

La figure 193 représente le schéma de connexion des contacts de la plaque à bornes aux extrémités des enroulements d'une machine triphasée. Un jeu de trois barrettes de cuivre permet de changer facilement le schéma de branchement des enroulements.

Lorsqu'on a un moteur sur la fiche signalétique duquel est marqué 127/220 V, ce moteur peut être utilisé sous la tension de 127 ou de 220 V.

Si la tension composée est de 127 V, les enroulements des moteurs doivent être couplés en triangle (fig. 193, *b*).

L'enroulement de chaque phase du moteur se trouvera alors sous la tension de 127 V. Pour la tension de 220 V, les enroulements du moteur doivent être couplés en étoile (fig. 193, *a*) et chaque enroulement de phase se trouvera aussi sous la tension de 127 V.

§ 106. PUISSANCE DU COURANT TRIPHASÉ

On sait que la puissance active d'un courant monophasé est calculée d'après la formule :

$$P = I_{ph} U_{ph} \cos \varphi \ \mathrm{W},$$

où I_{ph} et U_{ph} sont les valeurs du courant et de la tension simples et φ est l'angle de déphasage entre eux.

Pour une charge équilibrée d'un système triphasé la puissance absorbée par chaque phase est la même et, pour cette raison, la puissance de toutes les trois phases est :

$$P = 3 I_{ph} U_{ph} \cos \varphi \ \mathrm{W}.$$

Prenons le montage en étoile. Nous avons établi plus haut que

$$I_{com} = I_{ph}\,; \quad U_{com} = U_{ph} \sqrt{3}.$$

En introduisant dans la formule de la puissance des trois phases les valeurs du courant composé et de la tension composée on obtient :

$$P = 3 I_{com} \frac{U_{com}}{\sqrt{3}} \cos \varphi.$$

La formule de la puissance active du courant triphasé pour le montage en étoile prend la forme suivante :

$$P = \sqrt{3}\, I_{com} U_{com} \cos \varphi \ \mathrm{W}.$$

La puissance apparente est :

$$S = \sqrt{3}\, I_{com} U_{com} VA.$$

Pour le montage en triangle, on sait que

$$U_{com} = U_{ph}\,;$$

$$I_{com} = I_{ph} \sqrt{3}.$$

En introduisant dans la formule de la puissance des trois phases les valeurs du courant et de la tension com-

posés on obtient :

$$P = 3\frac{I_{com}}{\sqrt{3}} U_{com} \cos\varphi,$$

et la formule de la puissance active du courant triphasé pour le montage en triangle prend la forme suivante :

$$P = \sqrt{3}\, I_{com} U_{com} \cos\varphi \text{ W}.$$

La puissance apparente :

$$S = \sqrt{3}\, I_{com} U_{com} \text{ VA}.$$

On voit que les formules des puissances sont les mêmes pour le montage en étoile et pour le montage en triangle.

Ainsi, les puissances active et apparente d'un système triphasé peuvent être calculées d'après les formules:

$$P = \sqrt{3}\, IU \cos\varphi \text{ W} \quad \text{et} \quad S = \sqrt{3}\, IU \text{ VA},$$

où I et U sont le courant composé et la tension composée.

On ne doit pas oublier que ces formules ne sont valables que pour une charge équilibrée.

Exemple 3. La résistance ohmique d'un récepteur triphasé à charge équilibrée est de 6 ohms par phase et la réactance d'induction est de 8 ohms par phase. La tension composée est de 220 V. Calculer la puissance du récepteur, s'il est monté en étoile.

$$U_{ph} = \frac{U_{com}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V};$$

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = \sqrt{100} = 10 \text{ ohms};$$

$$I_{ph} = \frac{U_{ph}}{z} = \frac{127}{10} = 12{,}7 \text{ A};$$

$$\cos\varphi = \frac{r}{z} = \frac{6}{10} = 0{,}6;$$

$$P_{ph} = I_{ph} U_{ph} \cos\varphi = 12{,}7 \cdot 127 \cdot 0{,}6 = 967{,}74 \text{ W}.$$

La puissance des trois phases :

$$P = 967{,}74 \cdot 3 = 2903{,}22 \text{ W} \approx 2{,}9 \text{ kW}.$$

Cette puissance peut être déterminée aussi de façon suivante :

$$P = \sqrt{3} IU \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 12{,}7 \cdot 220 \cdot 0{,}6 = 2903{,}22 \text{ W} \approx 2{,}9 \text{ kW}.$$

Pour une charge non équilibrée, on doit tout d'abord calculer la puissance absorbée par chaque phase et ensuite additionner les puissances des trois phases.

Exemple 4. Les enroulements d'un récepteur de courant triphasé connectés en triangle sont branchés sur une tension composée de 380 V (fig. 194).

La résistance ohmique de la phase *I* $r_1 = 8$ ohms, la réactance d'induction $x_{L1} = 4$ ohms. La résistance ohmique de la phase *II*

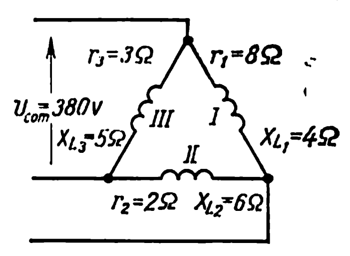


Fig. 194. Schéma pour l'exemple 4

$r_2 = 2$ ohms et la réactance d'induction $x_{L2} = 6$ ohms. La résistance ohmique de la phase *III* $r_3 = 3$ ohms et la réactance d'induction $x_{L3} = 5$ ohms. Quelle est la puissance totale des trois phases?

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2} = \sqrt{8^2 + 4^2} = \sqrt{80} = 8{,}9 \text{ ohms};$$

$$I_{\text{ph1}} = \frac{U_{\text{ph}}}{z_1} = \frac{380}{8{,}9} = 42{,}6 \text{ A};$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} = \frac{8}{8{,}9} = 0{,}9;$$

$$P_1 = I_{\text{ph1}} U_{\text{ph1}} \cos \varphi_1 = 42{,}6 \cdot 380 \cdot 0{,}9 = 14\,569 \text{ W};$$

$$z_2 = \sqrt{2^2 + 6^2} = \sqrt{40} = 6{,}3 \text{ ohms};$$

$$I_{\text{ph2}} = \frac{380}{6{,}3} = 60{,}3 \text{ A};$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{2}{6{,}3} = 0{,}32;$$

$$P_2 = 60{,}3 \cdot 380 \cdot 0{,}32 = 7332 \text{ W};$$

$$z_3 = \sqrt{3^2 + 5^2} = \sqrt{34} = 5{,}8 \text{ ohms};$$

$$I_{\text{ph3}} = \frac{380}{5{,}8} = 65{,}5 \text{ A};$$

$$\cos \varphi_3 = \frac{3}{5{,}8} = 0{,}51.$$

$$P_3 = 65{,}5 \cdot 380 \cdot 0{,}51 = 12\,694 \text{ W}.$$

La puissance des trois phases:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 14\,569 + 7\,332 + 12\,694 = 34\,595 \text{ W} \approx 34{,}5 \text{ kW}.$$

§ 107. PRODUCTION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE TOURNANT PAR UN COURANT TRIPHASÉ

L'une des propriétés remarquables du courant triphasé (ainsi que d'autres courants polyphasés) est sa capacité de créer un champ magnétique tournant.

Enroulons sur un anneau en fer trois bobines décalées de 120° l'une par rapport à l'autre. Plaçons un cylindre

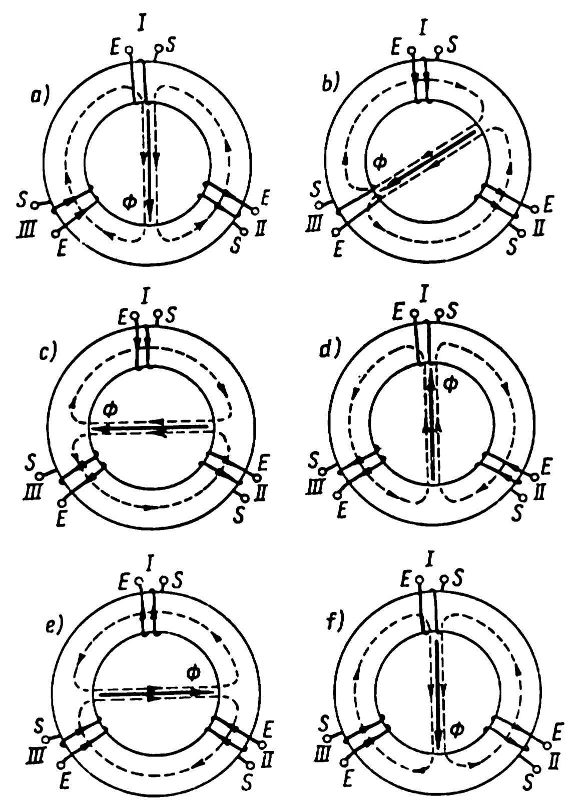


Fig. 195. Création d'un champ tournant par un courant triphasé

d'acier à l'intérieur de l'anneau. Faisons passer par les bobines un courant triphasé (fig. 195). Nous allons considérer comme positif le sens du courant lorsque celui-ci circule depuis l'entrée vers la sortie des bobines et comme négatif lorsqu'il circule de la sortie vers l'entrée des bobines.

La figure 196 représente les courbes de variation du courant triphasé. Considérons la position *a*. Les courbes montrent qu'à cet instant le courant de la première phase i_1 est nul. Le courant de la troisième phase i_3 a une valeur positive et celui de la deuxième phase i_2 a une valeur négative.

Sur la figure 195 on voit pour la position *a* les sens des courants dans les bobines de chaque phase. Le sens du

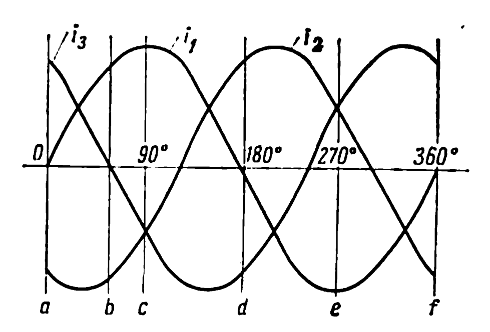


Fig. 196. Courbes d'un courant triphasé

champ magnétique créé par chaque bobine est déterminé d'après la « règle du tire-bouchon ». Le sens du champ magnétique résultant est indiqué par le vecteur Φ.

En examinant les différentes positions de *a* à *f* représentées sur les figures 195 et 196, en trouvant les sens des courants de chaque phase et en traçant le flux magnétique résultant, on voit que le vecteur Φ ne change pas en valeur, mais sa position dans l'espace n'est pas la même. En effet, il tourne. De cette façon, un champ magnétique tournant est créé à l'intérieur de l'anneau.

Le sens de rotation du champ magnétique dépend de l'ordre de succession des phases (*I*, *II*, *III*). En modifiant la succession des phases on peut changer le sens de rotation du champ magnétique. A cette fin, il suffit d'intervertir deux fils de ligne allant vers les enroulements.

Le champ tournant a trouvé un large emploi.

Lorsqu'on place un tambour de fer (fig. 197) à l'intérieur d'un anneau de fer portant trois enroulements et on fait passer par les enroulements un courant triphasé, le champ magnétique tournant ainsi formé coupera le tam-

bour et y induira des courants qui, agissant sur le champ magnétique tournant, mettront en rotation le tambour.

Les moteurs synchrones et asynchrones à courant alternatif utilisent cette propriété du courant triphasé de créer un champ magnétique tournant. Nous décrirons plus loin en détail l'organisation de pareils moteurs.

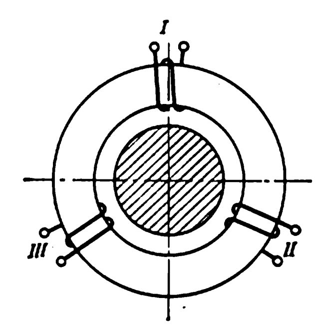


Fig. 197. Méthode de production de champ tournant

Un champ magnétique tournant peut être créé non seulement par un courant triphasé mais aussi par d'autres courants polyphasés (diphasé, tetraphasé, hexaphasé). On peut également obtenir un champ magnétique tournant à l'aide d'un courant monophasé en créant artificiellement un déphasage entre les courants de deux bobines disposées dans l'espace, par exemple, sous un angle de 90° l'une par rapport à l'autre.

Problèmes

1. La tension entre les phases d'un système triphasé à quatre fils est de 220 V. Sur ce réseau sont branchées 90 lampes à incandescence de 150 W chacune et leur nombre par phase est le même. Calculer la tension pour laquelle doivent être prévues ces lampes et les courants qui circulent dans les fils de la ligne.

2. Trente lampes à incandescence réparties en trois groupes égaux sont branchées entre les fils d'un réseau triphasé. Chaque lampe absorbe 0,5 A. Calculer les courants qui circulent dans les fils de ligne.

3. La puissance d'un transformateur triphasé est de 50 kVA. Calculer la puissance active que ce transformateur peut fournir pour les facteurs de puissance de la charge suivants: 1; 0,8; 0,6; 0,2.

4. Calculer le courant absorbé par un moteur triphasé de 5,4 kW si la tension du réseau est de 220 V et le facteur de puissance est de 0,8?

5. Trois bobines d'inductance sont montées en étoile. La résistance ohmique de chaque bobine est de 6 ohms et la réactance d'induction est de 5 ohms. Calculer la puissance active et la puissance apparente absorbées par les trois bobines, la tension du réseau étant de 220 V.

6. Une bobine à noyau de fer a une résistance ohmique de 4 ohms et une réactance d'induction de 6 ohms. Quelle sera l'indication d'un wattmètre triphasé lorsqu'on branche trois bobines identiques en étoile et puis en triangle sur une ligne de 220 V ?

7. La tension d'un alternateur triphasé est de 220 V. Le wattmètre du tableau de distribution indique 13,2 kW. Sur la ligne sont branchées des lampes à incandescence montées en triangle. Chaque lampe absorbe 0,25 A. Calculer le nombre de lampes alimentées par l' alternateur.

8. Un moteur à courant triphasé de 3 ch est branché sur un réseau de 220 V. Le facteur de puissance du moteur est égal à 0,8. Calculer le courant absorbé par le moteur.

9. Un moteur triphasé branché sur un réseau de 220 V absorbe un courant de 10 A. Le cos φ du moteur est de 0,85, le rendement étant de 80 %. Calculer la puissance sur l'arbre du moteur.

10. Une bobine a une résistance ohmique de 3 ohms et une réactance de 20 ohms. Une deuxième bobine a une résistance ohmique de 2 ohms et une réactance de 15 ohms. Une troisième bobine a une résistance ohmique de 6 ohms et une réactance de 30 ohms. Les bobines sont montées en triangle et branchées sur un réseau de 120 V. Calculer la puissance active absorbée par les trois bobines.

11. Sur la plaque signalétique d'un alternateur triphasé on lit : tension 120 V, courant 40 A. Quel est le nombre maximal de lampes à incandescence qu'on peut brancher sur la machine si elles sont montées en triangle et chacune d'elles absorbe un courant de 0,25 A ?

Questions de contrôle

1. Qu'est-ce qu'un courant triphasé ?
2. Comment obtient-on le courant triphasé ?
3. Qu'est-ce qu'un système triphasé à 6 fils ? A 4 fils ? A 3 fils ?
4. Qu'est-ce que la tension simple ? La tension composée ?
5. Quelles sont les relations entre les tensions simples et les tensions composées ainsi qu'entre les courants simples et les courants composés dans un montage en étoile ? Dans un montage en triangle ?
6. Comment un courant triphasé peut-il créer un champ magnétique tournant ?

CHAPITRE IX

TRANSFORMATEURS

§ 108. GÉNÉRALITÉS

Nous avons indiqué plus haut qu'un transformateur est un appareil électrique basé sur le phénomène d'induction mutuelle et destiné à transformer le courant alternatif d'une tension déterminée en courant alternatif d'une autre tension, mais de même fréquence. Le transformateur le plus simple a un noyau de fer et deux enroulements qui sont isolés aussi bien du noyau que l'un de l'autre (fig. 198).

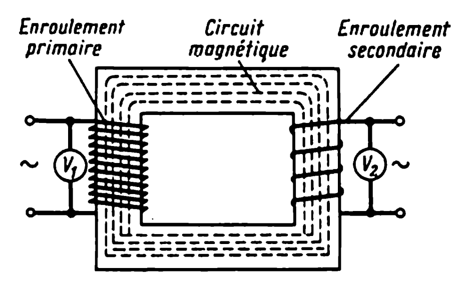


Fig. 198. Construction schématique d'un transformateur

On appelle *enroulement primaire* du transformateur celui qui est connecté à la source de tension et *enroulement secondaire* celui auquel sont connectés les récepteurs (lampes à incandescence, moteurs électriques, appareils de chauffage, etc.) ou les lignes de transmission allant vers les récepteurs.

En passant par l'enroulement primaire le courant alternatif crée un flux magnétique alternatif qui traverse les spires de l'enroulement secondaire et y induit une F.É.M.

Le flux magnétique étant alternatif, la F.É.M. induite dans l'enroulement secondaire du transformateur est également alternative et sa fréquence est égale à celle du courant traversant l'enroulement primaire.

Le flux magnétique alternatif passant par le noyau du transformateur coupe non seulement l'enroulement secondaire, mais aussi l'enroulement primaire du transformateur. Pour cette raison, l'enroulement primaire est aussi le siège d'une F.É.M. induite.

Les valeurs des F.É.M. induites dans les enroulements du transformateur dépendent de la fréquence du courant alternatif, du nombre de spires de chaque enroulement et du flux magnétique dans le noyau, c'est-à-dire que $E = 4{,}44\, fw\Phi_m$. Pour une fréquence déterminée et un flux magnétique constant, la valeur de la F.É.M. de chaque enroulement ne dépend que du nombre de spires de cet enroulement. La relation qui existe entre les valeurs des F.É.M. et le nombre de spires des enroulements d'un transformateur peut s'exprimer par la formule suivante:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

où E_1 et E_2 sont les F.É.M. de l'enroulement primaire et de l'enroulement secondaire;

w_1 et w_2 sont les nombres de spires de l'enroulement primaire et de l'enroulement secondaire.

Les voltmètres V_1 et V_2 connectés aux bornes de l'enroulement primaire et de l'enroulement secondaire (fig. 198) indiquent les tensions U_1 et U_2 aux bornes de ces enroulements.

Si on désigne par U_2 la tension de l'enroulement secondaire à vide on peut écrire pour les transformateurs de construction courante fonctionnant à vide: $U_1 \approx E_1$ et $U_2 \approx E_2$.

Mais pratiquement la différence entre les F.É.M. et les tensions est tellement petite que la relation entre les tensions et les nombres de spires des deux enroulements peut être exprimée par la formule suivante:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2}.$$

On voit d'après cette formule que les tensions des enroulements primaire et secondaire sont proportionnelles aux nombres de spires des enroulements respectifs.

La différence entre la F.É.M. et la tension aux bornes de l'enroulement primaire du transformateur devient particulièrement petite lorsque l'enroulement secondaire est

ouvert et n'est parcouru par aucun courant (fonctionnement à vide), tandis que l'enroulement primaire n'est traversé que par un faible courant appelé courant à vide. La tension aux bornes de l'enroulement secondaire est dans ce cas égale à la F.É.M. qui y est induite.

Le nombre qui indique de combien de fois la tension de l'enroulement primaire est plus grande (ou plus petite) que la tension de l'enroulement secondaire est appelé *rapport de transformation du transformateur* et est désigné par la lettre k:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

La tension nominale des enroulements de haute et de basse tension indiquée sur la plaque signalétique du transformateur se rapporte à la marche à vide.

On admet que les courants nominaux des enroulements sont égaux aux quotients obtenus par division de la puissance nominale du transformateur par les tensions nominales correspondantes.

Exemple 1. On a un transformateur dont l'enroulement primaire est branché sur un réseau de 6600 V et la tension aux bornes de l'enroulement secondaire est de 230 V. Calculer le rapport de transformation.

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{6600}{230} = 28{,}7.$$

Dans la fiche signalétique de chaque transformateur sont toujours indiquées les tensions nominales des deux enroulements se rapportant à la marche à vide. Il est donc facile de trouver le rapport de transformation.

Le rapport de transformation peut aussi être déterminé par voie expérimentale. A cet effet, il convient (en observant les règles de sécurité pour prévenir l'électrocution) de brancher des voltmètres aux bornes des enroulements primaire et secondaire du transformateur et ouvrir le circuit de l'enroulement secondaire en assurant ainsi le fonctionnement à vide du transformateur. Ensuite, il faut diviser l'indication du voltmètre connecté à l'enroulement primaire par l'indication du voltmètre connecté à l'enroulement secondaire.

Exemple 2. L'enroulement primaire d'un transformateur est branché sur un réseau de 10 000 V; la tension aux bornes de l'enroulement secondaire est de 100 V. Calculer le rapport de transformation

et le nombre de spires de l'enroulement secondaire si le nombre de spires de l'enroulement primaire est de 21 000.

Le rapport de transformation:

$$k=\frac{10\,000}{100}=\frac{U_1}{U_2}=100.$$

Pour déterminer le nombre de spires de l'enroulement secondaire on peut utiliser la formule:

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{w_1}{w_2}.$$

En introduisant les chiffres, on obtient:

$$\frac{10\,000}{100}=\frac{21\,000}{w_2},$$

d'où

$$w_2=\frac{100\cdot 21\,000}{10\,000}=210 \text{ spires.}$$

Le même résultat est obtenu si l'on se souvient que

$$k=\frac{w_1}{w_2}, \quad \text{d'où } w_2=\frac{w_1}{k}.$$

Puisque $k=100$ et $w_1=21\,000$, on a

$$w_2=\frac{21\,000}{100}=210 \text{ spires.}$$

Dans les exemples que nous avons examinés les transformateurs étaient utilisés pour abaisser la tension. Ces transformateurs sont appelés transformateurs *abaisseurs* et leur rapport de transformation est supérieur à l'unité.

Exemple 3. Prenons le même transformateur que dans l'exemple précédent, mais dans ce cas appliquons aux bornes de l'enroulement comportant 21 000 spires 9900 V et non pas 10 000 V. Puisque l'enroulement secondaire comporte 210 spires, c'est-à-dire 100 fois moins que l'enroulement primaire, la tension secondaire sera aussi 100 fois inférieure à la tension primaire. En introduisant dans la formule

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{w_1}{w_2}$$

les chiffres correspondants, on obtient

$$\frac{9900}{U_2}=\frac{21\,000}{210}; \quad U_2=\frac{9900\cdot 210}{21\,000}=99 \text{ } V.$$

On peut déduire de l'exemple considéré qu'une diminution de la tension aux bornes de l'enroulement primaire est accompagnée de la diminution de la tension aux bornes de l'enroulement secondaire du transformateur.

Exemple 4. Si l'on branche l'enroulement comportant 210 spires du transformateur examiné précédemment sur la tension de 100 V, cet enroulement sera appelé maintenant enroulement primaire.

Aux bornes de l'enroulement secondaire comportant 21 000 spires la tension sera 100 fois plus grande, c'est-à-dire 10 000 V.

Le rapport de transformation du transformateur sera:

$$k=\frac{U_1}{U_2}=\frac{100}{10\,000}=\frac{1}{100}\,.$$

Le transformateur examiné dans le dernier exemple sert à élever la tension. De tels transformateurs sont appelés *transformateurs élévateurs* et leur rapport de transformation est inférieur à l'unité.

Jusqu'à présent nous avons supposé que le flux magnétique du transformateur se fermait entièrement par le noyau. En réalité, il n'en est pas ainsi. La plus grande partie

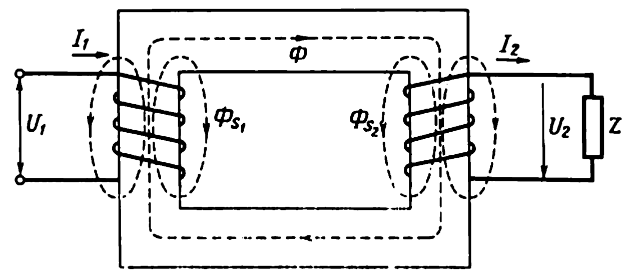


Fig. 199. Flux magnétiques d'un transformateur

des flux magnétiques créés par les enroulements primaire et secondaire se ferme par le noyau, tandis que l'autre partie sous forme de flux de fuites Φ_{s1} et Φ_{s2} se ferme par l'air autour de certaines spires (fig. 199).

Pour plus de clarté les enroulements primaire et secondaire sont disposés sur des colonnes différentes. En réalité, pour diminuer les flux de fuites et, par conséquent, Φ_{s1} et Φ_{s2}, on place les enroulements sur les deux colonnes.

Les flux de fuites induisent dans leurs enroulements des F.É.M. dont les valeurs peuvent être déterminées par les formules :

$$E_{s1}=2\pi f L_{s1} I_1,$$

$$E_{s2}=2\pi f L_{s2} I_2,$$

où L_{s1} et L_{s2} sont les inductances de fuites des enroulements.

En désignant

$$x_{s1} = 2\pi f L_{s1},$$
$$x_{s2} = 2\pi f L_{s2},$$

on obtient:

$$E_{s1} = x_{s1} I_1,$$
$$E_{s2} = x_{s2} I_2,$$

où x_{s1} et x_{s2} sont les réactances de fuites des enroulements.

§ 109. FONCTIONNEMENT À VIDE D'UN TRANSFORMATEUR

Le régime pour lequel l'enroulement secondaire du transformateur est ouvert et aux bornes de l'enroulement primaire est appliquée une tension alternative est appelé *fonctionnement* ou *marche à vide*.

Le flux magnétique engendré par l'enroulement primaire induit dans l'enroulement secondaire une F.É.M. :

$$E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_m.$$

Le même flux magnétique induit dans l'enroulement primaire une F.É.M. :

$$E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_m,$$

qui équilibre dans un transformateur sans pertes la tension appliquée U_1.

Le faible courant absorbé par l'enroulement primaire d'un transformateur fonctionnant à vide est appelé *courant à vide*. La valeur de ce courant varie généralement de 3,5 à 10 % du courant absorbé par le transformateur fonctionnant en charge nominale.

Construisons le diagramme vectoriel des tensions pour le fonctionnement à vide d'un transformateur monophasé sans pertes (transformateur parfait) (fig. 200). Le courant magnétisant I_r crée un flux magnétique Φ_m qui est en phase avec le courant I_r.

Le flux magnétique Φ_m induit dans l'enroulement primaire une F.É.M. E_1 et dans l'enroulement secondaire une F.É.M. E_2. On sait que toute F.É.M. induite par un flux magnétique à variation sinusoïdale est décalée en arrière

de 90° par rapport au flux (voir § 86). Pour cette raison, nous traçons les vecteurs E_1 et E_2 sous un angle de 90° par rapport au flux Φ_m dans le sens opposé à celui de la rotation des vecteurs.

La F.É.M. E_1 induite dans l'enroulement primaire est compensée par la tension du réseau U_1. La F.É.M. E_1 et la tension U_1 sont égales et de signes contraires.

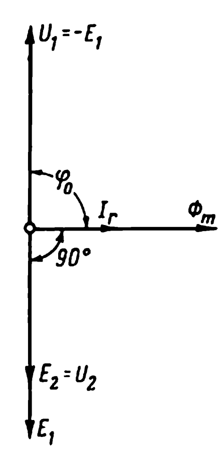


Fig. 200. Diagramme vectoriel du fonctionnement à vide d'un transformateur parfait

On voit d'après le diagramme vectoriel que le courant I_r absorbé par le transformateur fonctionnant à vide est en retard de 90° sur la tension du réseau U_1.

Dans un transformateur réel il faut tenir compte des pertes et des fuites du flux magnétique. Les pertes ont lieu dans le fer et dans le cuivre. Les pertes dans le fer comprennent les pertes par hystérésis et par courants de Foucault dans le noyau de fer; les pertes électriques dans le cuivre sont des pertes dues à l'effet Joule dans l'enroulement chauffé par le courant. Le transformateur diffère des autres machines et appareils par son circuit magnétique fermé et l'absence de parties tournantes. Pour cette raison, les pertes dans un transformateur sont petites et le rendement des transformateurs de grande puissance atteint 99 % et même plus.

Le courant à vide I_0 d'un transformateur comprend deux composantes (fig. 201): 1) une composante active $I_a = I_0 \cos \varphi_0$ due aux pertes dans le fer; cette composante est très petite parce que les pertes à vide sont très faibles; 2) une composante réactive $I_r = I_0 \sin \varphi_0$, appelée courant magnétisant, qui crée le flux magnétique Φ_m se trouvant en phase avec le courant. Vu la faible valeur de la composante active $I_0 \cos \varphi_0$, le courant magnétisant est presque égal au courant à vide I_0. Pour cette raison I_0 est presque complètement réactif.

La grande différence existant entre la tension primaire et la tension secondaire d'un transformateur rend difficile la construction de leurs diagrammes vectoriels. Aussi, lors de l'étude des transformateurs, l'enroulement secon-

daire est-il ramené (réduit) au nombre de spires de l'enroulement primaire, c'est-à-dire qu'on suppose le nombre de spires w_2 de l'enroulement secondaire égal au nombre de spires w_1 de l'enroulement primaire. Dans ce cas, la F.É.M, le courant et la résistance de l'enroulement secondaire changent. Par contre, la puissance et l'angle de déphasage dans le transformateur doivent rester les mêmes.

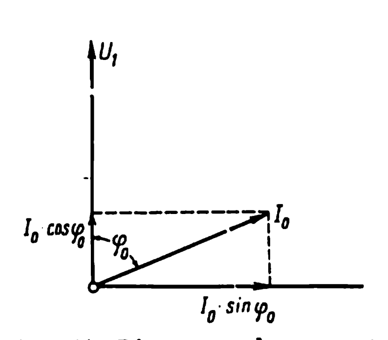


Fig. 201. Diagramme du courant à vide

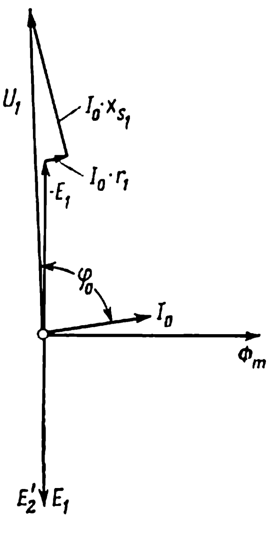


Fig. 202. Diagramme vectoriel du fonctionnement à vide d'un transformateur réel

Les grandeurs ramenées de l'enroulement secondaire sont désignées par des lettres affectées d'un accent, par exemple E_2', I_2', r_2', etc. Pour obtenir E_2' il faut multiplier E_2 par le rapport de transformation $k = \frac{w_1}{w_2}$.

On a donc:

$$E_2' = \frac{w_1}{w_2} E_2 = kE_2 = E_1.$$

On détermine le courant secondaire ramené I_2' en partant de la condition qu'après la réduction la puissance apparente de l'enroulement secondaire doit rester inchangée

$$E_2' I_2' = E_2 I_2,$$

d'où

$$I_2' = \frac{E_2}{E_2'} I_2 = \frac{1}{k} I_2.$$

Construisons le diagramme vectoriel des tensions d'un transformateur réel fonctionnant à vide (fig. 202). La tension du réseau appliquée à l'enroulement primaire doit équilibrer la F.É.M. E_1, la chute de tension active I_0r_1 en phase avec le courant I_0, et la chute de tension inductive I_0x_{s1} qui est en avance de 90° sur le courant I_0. La somme géométrique des vecteurs E_1, I_0r_1 et I_0x_{s1} donne la tension du réseau U_1.

§ 110. FONCTIONNEMENT D'UN TRANSFORMATEUR EN CHARGE

On dit qu'un transformateur est en charge lorsque son enroulement secondaire est fermé sur une résistance. L'enroulement secondaire est alors parcouru par un courant I_2 qui crée un flux magnétique Φ_2. De cette façon, lorsque le transformateur est en charge, il est soumis aux forces magnétisantes des deux enroulements et son noyau comporte un flux magnétique dû à l'action des flux des deux enroulements.

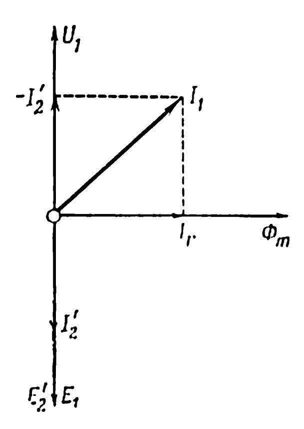


Fig. 203. Diagramme vectoriel d'un transformateur parfait alimentant une charge active

Selon la loi de Lenz, le flux magnétique de l'enroulement secondaire Φ_2 tend à diminuer le flux dû à l'enroulement primaire. Mais le flux résultant doit rester constant (plus précisément, presque constant) parce que la F.É.M. E_1 qu'il induit, la tension du réseau U_1 étant constante, doit rester presque invariable et presque égale à la tension U_1. Construisons le diagramme vectoriel pour un transformateur parfait en charge lorsqu'on branche une résistance ohmique aux bornes de son enroulement secondaire.

Le flux magnétique du transformateur Φ_m et le courant magnétisant I_r sont en phase (fig. 203). Les forces électromotrices E_1 et E_2' sont en arrière de 90° par rapport au flux magnétique Φ_m. Puisque la charge est ohmique et le transformateur est sans pertes, le courant I_2' est en phase avec la F.É.M. E_2'. Lorsque le transformateur est chargé la somme

géométrique des forces magnétisantes des enroulements primaire et secondaire sera presque égale à la force magnétisante de l'enroulement primaire lors du fonctionnement à vide:

$$\overline{I}_1 w_1 + \overline{I}_2 w_2 = \overline{I}_0 w_1.$$

D'après la loi de Lenz, la force magnétisante de l'enroulement secondaire $I_2 w_2$ tendra à diminuer le flux de l'enroulement primaire. Les spires de l'enroulement primaire doivent donc être parcourues par un courant I_1 produisant un flux magnétique Φ_m et compensant l'action démagnétisante de l'enroulement secondaire. Autrement dit, la force magnétisante de l'enroulement primaire $I_1 w_1$ doit comprendre la force magnétisante $I_0 w_1$ qui crée le flux Φ_m et la force magnétisante $I_2 w_2$ qui compense la force magnétisante de l'enroulement secondaire:

$$I_1 w_1 = I_0 w_1 - I_2 w_2$$

ou

$$\overline{I}_1 = -\overline{I}_2 \frac{w_2}{w_1} + \overline{I}_0 = -\overline{I}'_2 + \overline{I}_0.$$

Ainsi, le courant primaire est égal, dans ce cas, à la somme géométrique du courant à vide $\overline{I}_0$ et de la valeur négative du courant de l'enroulement secondaire ramené $\overline{I}'_2$.

Construisons le diagramme vectoriel d'un transformateur réel débitant sur une charge active (fig. 204). La tension aux bornes de l'enroulement secondaire U'_2 est inférieure à la F.É.M. $\overline{E}'_2$ de la valeur des chutes de tensions dans l'enroulement lui-même. Nous obtiendrons donc la tension U'_2 (le vecteur OK) en retranchant géométriquement de la F.É.M. E'_2 (OP) la chute de tension inductive $I'_2 x'_{s2}$ et la chute de tension active $I'_2 r'_2$. Puisque la charge est active, le courant I'_2 est en phase avec la tension U'_2. Le courant du circuit primaire $\overline{I}_1$ est obtenu par composition géométrique du courant à vide $\overline{I}_0$ et du courant de charge ramené pris avec un signe inverse $-I'_2$. La tension appliquée à l'enroulement primaire U_1 du transformateur doit équilibrer la F.É.M. E_1 et la chute de tension dans cet enroulement. Pour obtenir la tension U_1, il faut donc composer géométriquement $-E'_1$ qui équilibre la F.É.M. E_1 (OD), la chute de tension active dans l'enroulement primaire $I_1 r_1$ (DM), qui est en phase avec le courant, et la chute de tension inductive dans cet enroulement $I_1 x_{s1}$ (MF).

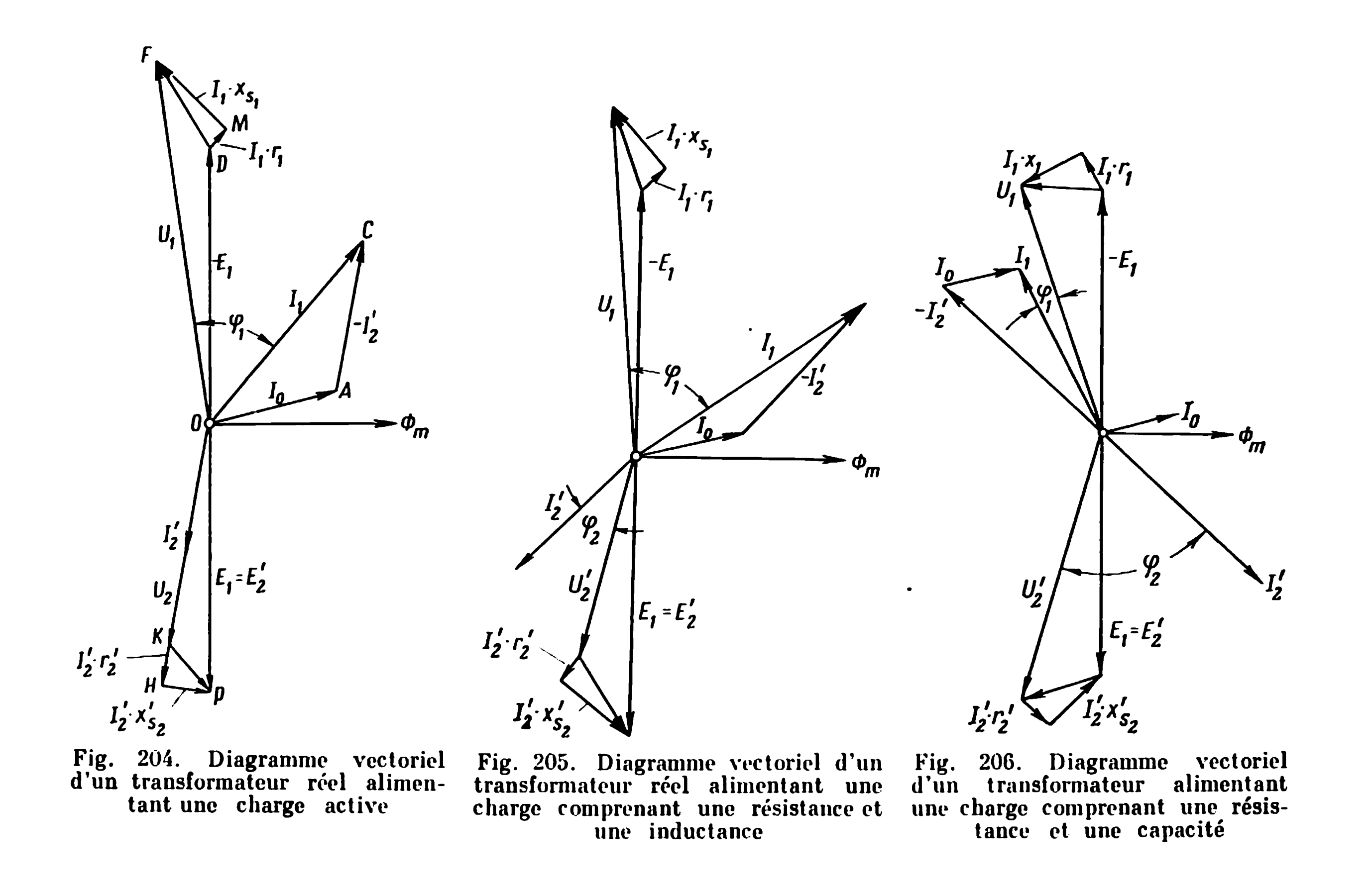


Fig. 204. Diagramme vectoriel d'un transformateur réel alimentant une charge active

Fig. 205. Diagramme vectoriel d'un transformateur réel alimentant une charge comprenant une résistance et une inductance

Fig. 206. Diagramme vectoriel d'un transformateur alimentant une charge comprenant une résistance et une capacité

Le vecteur *OF* détermine la valeur et la phase de la tension appliquée U_1.

Le diagramme vectoriel d'un transformateur débitant dans une charge comprenant une résistance et une inductance est indiqué sur la figure 205 et le diagramme à charge active et capacitive, sur la figure 206. La construction des diagrammes vectoriels d'un transformateur réel montre que l'accroissement du courant de charge I_2 provoque : 1) un accroissement de la chute de tension dans l'enroulement secondaire ; 2) une diminution de la tension U_2 aux bornes de l'enroulement secondaire (en cas d'une charge capacitive la tension U_2 peut augmenter) ; 3) un accroissement du courant I_1 dans le circuit primaire ; 4) un accroissement de la chute de tension dans l'enroulement primaire ; 5) lorsque la tension appliquée U_1 est constante, cela provoque une diminution de E_1 ; 6) la F.É.M. E_1 ne peut diminuer qu'avec la diminution du flux magnétique Φ_m du transformateur.

Ainsi, l'accroissement du courant de charge I_2 provoque non seulement un accroissement du courant I_1 absorbé par le transformateur, mais aussi une diminution du flux magnétique dans le noyau. Mais entre la marche à vide et la pleine charge les variations du flux magnétique Φ_m ne sont pas grandes et souvent lors des calculs approchés on le considère comme constant.

§ 111. ESSAIS À VIDE ET EN COURT-CIRCUIT D'UN TRANSFORMATEUR

Si l'on branche l'enroulement primaire d'un transformateur sur la tension du réseau et on court-circuite les bornes de son enroulement secondaire, il se produit un court-circuit qui est très dangereux dans le cas des transformateurs. Le courant de court-circuit dégage une grande quantité de chaleur dans les enroulements, ce qui peut provoquer la dégradation de l'isolation des enroulements, la décomposition et l'inflammation de l'huile remplissant le bac du transformateur. Les contraintes mécaniques qui ont lieu dans les enroulements d'un transformateur en cas de court-circuit peuvent parfois détruire les enroulements.

Mais si on court-circuite les bornes de l'enroulement secondaire et on branche l'enroulement primaire sur une tension réduite de façon que le courant de court-circuit I_{2cc} soit égal au courant nominal I_{2n}, il n'arrivera rien

de grave au transformateur. Tel essai est appelé *essai en court-circuit*. La tension sur laquelle est branché l'enroulement primaire du transformateur lors de l'essai en court-circuit représente quelques pour cent de la tension nominale de cet enroulement. Elle est appelée *tension de court-circuit* et est désignée par U_{cc}.

Les transformateurs de puissance fabriqués en U.R.S.S. ont une tension de court-circuit de 5 à 10 % (dans certains cas, 17 %) de la tension primaire nominale.

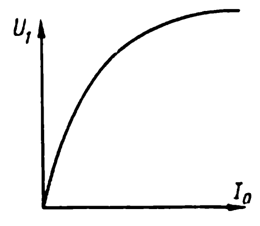


Fig. 207. Caractéristique à vide d'un transformateur

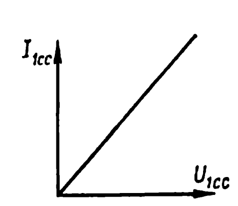


Fig. 208. Caractéristique en court-circuit d'un transformateur

Lors des essais des transformateurs, on relève toujours la caractéristique à vide et la caractéristique en court-circuit.

Pour relever la caractéristique à vide d'un transformateur on ouvre son enroulement secondaire et dans l'enroulement primaire on branche un ampèremètre, un voltmètre et un wattmètre. On augmente progressivement la tension sur laquelle est branché l'enroulement primaire et on inscrit les indications des appareils. Une caractéristique approximative de marche à vide d'un transformateur est indiquée à titre d'exemple sur la figure 207.

Pour de faibles tensions correspondant à la partie initiale de la caractéristique à vide, le circuit magnétique du transformateur n'est pas saturé et une proportionnalité existe entre la tension U et le courant I_0. Avec l'augmentation ultérieure de la tension, le noyau du transformateur est saturé et le courant I_0 augmente plus rapidement que la tension.

D'après les données de l'essai à vide on calcule la résistance et la réactance inductive, le facteur de puissance, les composantes active et réactive du courant à vide.

La puissance fournie au transformateur lors de la marche à vide sert à couvrir les pertes à vide. Puisque le courant à vide I_0 est faible, on peut négliger les pertes de puissance $I_0^2 r_1$ pour l'échauffement de l'enroulement primaire et admettre que la puissance absorbée par le transformateur lors de la marche à vide compense les pertes dans le fer du noyau.

Pour relever la caractéristique en court-circuit d'un transformateur, on place dans le circuit de son enroulement primaire un ampèremètre, un voltmètre et un wattmètre et on ferme son enroulement secondaire sur un ampèremètre. On augmente la tension appliquée à l'enroulement primaire jusqu'au moment où l'ampèremètre de l'enroulement secondaire indique le courant secondaire nominal. D'après les données de l'essai en court-circuit on calcule la résistance et la réactance inductive ainsi que la tension de court-circuit.

D'après les résultats de l'essai on trace une caractéristique en court-circuit qui montre qu'entre le courant et la tension existe une relation linéaire. Ceci s'explique par le fait que le flux magnétique dans le noyau est faible car la tension de court-circuit est très petite devant la tension nominale. Pour cette raison, lors de l'essai en court-circuit on peut négliger les pertes dans le fer et admettre que la puissance est dépensée pour les pertes dans le cuivre des enroulements du transformateur ($I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2$). Une caractéristique approximative d'un transformateur en court-circuit est donnée à titre d'exemple sur la figure 208.

D'après les résultats des essais à vide et en court-circuit on peut calculer le rendement d'un transformateur d'après la formule:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta P_n \cos\varphi_2}{\beta P_n \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_c},$$

où P_0 représente les pertes dans le fer qui sont pratiquement égales aux pertes mesurées lors de l'essai à vide sous tension nominale;

$\beta^2 P_c$ sont les pertes dans le cuivre proportionnelles au carré du courant de charge;

P_c sont les pertes dans le cuivre à charge nominale qui sont pratiquement égales à P_{cc} mesurées lors de l'essai en court-circuit pour $I_{cc} = I_n$;

$\beta = \frac{I_2}{I_{2n}}$ est le rapport du courant de charge au courant nominal.

§ 112. RÔLE DES TRANSFORMATEURS DANS LE TRANSPORT D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Exemple 5. Soit une centrale utilisant une génératrice à courant continu de 200 kW, 230 V. Calculer la section des fils de cuivre de la ligne de transport allant vers un récepteur situé à 10 kilomètres de la centrale.

Le courant parcourant l'enroulement de la génératrice et la ligne de transport est:

$$I=\frac{P}{U}=\frac{200\,000}{230}=870 \text{ A.}$$

Dans la ligne de transport il y a des pertes par effet Joule. Ces pertes sont inévitables. On peut seulement limiter leur grandeur.

Admettons que les pertes dans la ligne soient de 10 % de la puissance transmise, c'est-à-dire égales à 20 kW. On calcule la résistance de la ligne par la formule $P = 2\cdot I^2\cdot r$, d'où la résistance d'un fil:

$$r=\frac{P}{2\cdot I^2}=\frac{20\,000}{2\cdot 870^2}=0{,}013 \text{ ohm.}$$

La formule

$$r=\frac{\rho\cdot l}{S}$$

permet de déterminer la section des fils de la ligne:

$$S=\frac{\rho\cdot l}{r}=\frac{0{,}0175\cdot 10\,000}{0{,}013}=13\,461 \text{ mm}^2.$$

C'est la section d'un fil de 13,4 cm de diamètre. Un mètre d'un tel fil pèserait 119,8 kg. Le poids du fil de cuivre pour toute la ligne serait de 2396 tonnes.

Ce résultat montre qu'on ne peut pas utiliser le courant continu de basse tension pour transmettre à grande distance même une quantité relativement petite de l'énergie électrique.

Essayons maintenant de remplacer la génératrice à courant continu de notre centrale par une génératrice à courant alternatif appelée alternateur. Admettons que cet alternateur possède la même puissance de 200 kW et fournit une tension de 230 V. Admettons également que la charge du réseau soit active.

Installons dans la centrale un transformateur élévateur à rapport de transformation 1 : 43,4 (fig. 209).

La tension de la ligne de transport sera $230\cdot 43{,}4 = 10\,000$ V. Puisque les pertes dans le transformateur lui-même sont faibles, admettons que la puissance fournie par l'enroulement secondaire est égale à la puissance fournie à l'enroulement primaire du transformateur.

Si la puissance de l'enroulement primaire est de 200 kW, celle de l'enroulement secondaire sera la même. On a donc pour le courant secondaire du transformateur:

$$I=\frac{P}{U}=\frac{200\,000}{10\,000}=20 \text{ A.}$$

La formule

$$P = 2 \cdot I^2 r$$

montre que le courant dans la ligne de transport ayant diminué de 43,4 fois, la résistance des fils peut être $43,4^2$ fois plus grande et la section des fils peut être $43,4^2$ fois plus faible pour la même perte de puissance, c'est-à-dire:

$$S = \frac{13\,461}{43,4^2} = 7,1 \text{ mm}^2.$$

On choisit la section normalisée de 10 mm².

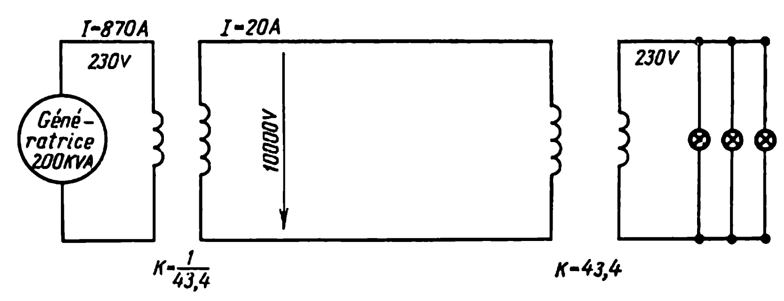


Fig. 209. Utilisation des transformateurs pour le transport de l'énergie électrique

Cet exemple met en évidence le rôle des transformateurs dans le transport de l'énergie électrique à grande distance.

En augmentant la tension de la ligne à l'aide d'un transformateur élévateur, on diminue le courant dans les fils de la ligne, ce qui permet de diminuer la section de ces fils. Plus la ligne de transport est longue et plus la puissance transmise est grande, plus la tension entre les fils de la ligne doit être élevée.

Mais généralement on ne peut brancher les récepteurs directement sur la ligne de haute tension. On place donc à la fin de la ligne un transformateur abaisseur qui transforme le courant de haute tension en courant de basse tension pouvant être utilisé par les récepteurs. Dans l'exemple cité (fig. 209) on a installé un transformateur abaisseur à rapport de transformation $k = 43,4$. Ainsi, les récepteurs recevront un courant à une tension un peu inférieure à 230 V si l'on tient compte de la chute de tension dans la ligne et dans les transformateurs (nous négligeons la chute de tension dans la ligne de transport).

A l'heure actuelle, on utilise des lignes de transport à tensions de 220, 287, 400 et 500 kV.

L'élévation de la tension de la ligne exige l'accroissement du nombre d'isolateurs auxquels sont suspendus les fils, l'accroissement des dimensions des pylônes et provoque un accroissement du prix des transformateurs élévateurs et abaisseurs et des sous-stations. Le transport d'une puissance de 1 million de kW à une distance de 1000 à 2000 kilomètres exige une tension de 500 ou 600 kV.

Actuellement, on utilise en U.R.S.S. des sources énormes d'énergie électrique. On construit de nouvelles usines hydrauliques en Sibérie, en Asie centrale, en Arménie, en Azerbaïdjan. On construit des installations utilisant l'énergie solaire dans l'Asie centrale; on édifie de grandes usines thermiques au voisinage des gisements de houille et des centrales à turbines à gaz utilisant comme combustible le gaz obtenu par transformation souterraine de la houille ou des schistes. On construit des centrales utilisant l'énergie atomique. Tout cela donne naissance à de puissants réseaux séparés souvent par de grandes distances.

On peut utiliser rationnellement l'énergie de différents réseaux en les interconnectant pour former un réseau unique à haute tension.

Les calculs montrent qu'il est avantageux de transmettre à de très grandes distances l'énergie électrique en courant continu de très haute tension (atteignant un million de volts). Le coût d'une telle ligne et de son équipement est presque deux fois inférieur au coût d'une ligne semblable à courant alternatif. La transmission d'énergie en courant continu à de très grandes distances sera réalisée d'après le schéma suivant. Dans une centrale, les alternateurs fournissent un courant triphasé sous une tension de 15 kV environ. Un transformateur élève la tension fournie par l'alternateur jusqu'à plusieurs centaines de kilovolts. Dans la même centrale, le courant alternatif est transformé à l'aide de redresseurs spéciaux en courant continu de haute tension qui arrive à un bout de la ligne de transport. A l'autre bout de la ligne est installé un *onduleur* transformant le courant continu en courant alternatif dont la tension est ensuite transformée par un transformateur abaisseur en tension nécessaire aux récepteurs.

§ 113. ORGANISATION ET TYPES DE TRANSFORMATEURS

La carcasse d'un transformateur est un circuit magnétique fermé pour le flux magnétique. Il est fabriqué en tôles d'acier magnétique de 0,5 ou de 0,35 mm d'épaisseur de marque Э4-2. L'acier magnétique comprend de 4,0 à 4,8 % de silicium en poids. Le silicium améliore les propriétés magnétiques de l'acier et augmente sa résistivité aux courants de Foucault. Pour les isoler les unes des autres, les tôles d'acier sont couvertes d'une couche de vernis et serrées par des boulons passant par des douilles isolantes.

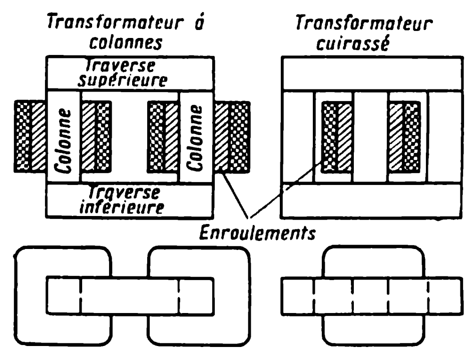


Fig. 210. Types de circuits magnétiques des transformateurs

Une telle disposition est utilisée pour réduire les courants de Foucault induits dans le fer par le flux magnétique alternatif. Les parties du circuit magnétique sur lesquelles sont disposés les enroulements sont appelées colonnes ou noyaux. Les colonnes sont réunies par deux culasses ou traverses (supérieure et inférieure).

Selon la construction du circuit magnétique on distingue les transformateurs *à colonnes* et les transformateurs *cuirassés* (fig. 210). Dans un transformateur à colonnes les enroulements entourent les colonnes du circuit magnétique; dans un transformateur cuirassé le circuit magnétique entoure les enroulements comme une cuirasse. Dans le cas de défectuosités dans l'enroulement d'un transformateur cuirassé il est difficile de l'examiner et de le réparer. Pour cette raison, les transformateurs à colonnes sont les plus répandus.

L'enroulement d'un transformateur est fait en fil de cuivre isolé de section circulaire ou rectangulaire. Sur la

colonne du circuit magnétique on place préalablement un cylindre isolant (généralement, en carton imprégné de vernis bakélite) sur lequel on met l'enroulement basse tension. La mise de l'enroulement basse tension plus près de la carcasse s'explique par le fait qu'il est plus facile de l'isoler par rapport à la carcasse de fer que l'enroulement haute tension.

Sur l'enroulement basse tension on place un autre cylindre isolant sur lequel on met l'enroulement haute tension. Ceci présente l'avantage qu'en cas d'une défectuosité (qui arrive plus souvent dans l'enroulement haute tension) il est accessible pour l'examen et la réparation.

Les sorties des enroulements haute et basse tensions passent par des isolateurs de traversée fixés sur le couvercle d'acier du transformateur.

La carcasse avec les enroulements est généralement placée dans une cuve rectangulaire ou ovale en tôle d'acier. La cuve est remplie d'huile minérale spéciale (pour transformateurs) qui possède une grande rigidité diélectrique.

Les spires de l'enroulement plongé dans l'huile sont bien isolées les unes des autres. En outre, l'huile qui possède une grande conductibilité thermique enlève la chaleur aux enroulements et la transmet à la cuve. Pour augmenter la surface de refroidissement, on utilise une cuve en tôle ondulée. Pour la même raison, on soude à la cuve des tubes qui communiquent avec la cuve dans la partie inférieure et dans la partie supérieure. Pour les transformateurs de grande puissance on soude les tubes en blocs appelés *radiateurs*, qui sont fixés à la cuve. Le couvercle du transformateur est fixé à la cuve par des boulons.

Lors du fonctionnement du transformateur, l'huile qui prend de la chaleur aux enroulements du transformateur s'échauffe et commence à se dilater. En se refroidissant, l'huile se comprime et l'air humide peut pénétrer dans l'espace libre. Pour éviter cela, on place entre le couvercle et la cuve un joint en caoutchouc qui ne permet pas à l'air de pénétrer à l'intérieur de la cuve.

Lorsque la cuve contient un grand volume d'huile, la dilatation de l'huile lors de l'échauffement peut être tellement grande que l'huile fuira en passant sous le couvercle. Pour permettre à l'huile de se dilater, on installe sur le couvercle du transformateur une cuve complémentaire appelée *conservateur d'huile*. Il est réuni par un tube avec la cuve

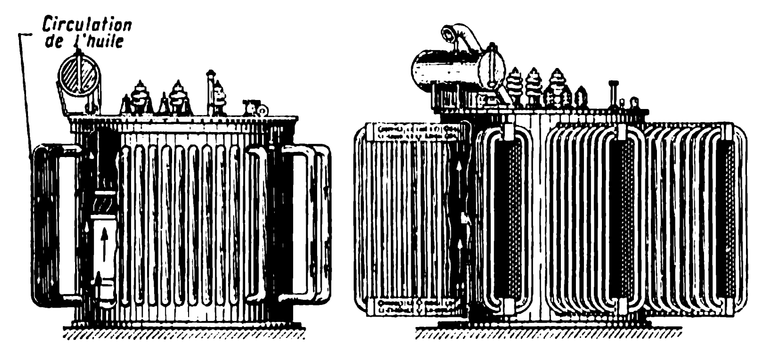
principale. Lors de l'échauffement l'huile est chassée dans le conservateur et lors du refroidissement elle revient dans la cuve. Le conservateur est doté d'un tube de verre permettant d'observer le niveau de l'huile. L'organisation que nous venons de décrire est celle des transformateurs refroidis par l'huile. Le refroidissement naturel des transformateurs de faible puissance (5 à 10 kVA) se fait souvent directement par l'air.

Pour améliorer le refroidissement des transformateurs à bain d'huile on les équipe de ventilateurs actionnés par des moteurs électriques. Pour la même raison, certains transformateurs sont munis d'une pompe refoulant l'huile chauffée de la partie supérieure de la cuve à travers un serpentin refroidi par l'eau courante et faisant venir l'huile refroidie dans la partie inférieure de la cuve. La figure 211 montre des transformateurs dans l'huile à refroidissement naturel et la figure 212 une partie d'un transformateur à bain d'huile à refroidissement forcé par l'air (par soufflage).

Le plus souvent la température de l'huile dans la cuve est surveillée à l'aide d'un thermomètre monté dans le couvercle du transformateur.

Nous avons examiné jusqu'à présent des transformateurs comportant deux enroulements par phase : un enroulement *haute tension* et un enroulement *basse tension*. Ces transformateurs sont appelés transformateurs *à deux enroulements*. Mais on fabrique aussi des transformateurs dont chaque phase comporte un enroulement primaire et deux enroulements secondaires. L'enroulement primaire est l'enroulement tension supérieure (TS). Les enroulements secondaires, selon la valeur de la tension à leurs bornes respectives, sont appelés enroulement de moyenne tension (TM) et enroulement de tension inférieure (TI). Ces transformateurs sont appelés transformateurs *à trois enroulements*. Les tensions des enroulements d'un tel transformateur sont désignées comme suit : 220/115/10,5 kV ou 110/35,8/11 kV.

La figure 213 montre un transformateur de puissance monophasé abaisseur à trois enroulements ОДТГ-90 000/400. Son enroulement de tension supérieure est prévu pour 400 kV, l'enroulement de tension moyenne est de 110 kV et l'enroulement de tension inférieure est de 11 kV. Le refroidissement est assuré par des radiateurs tubulaires soufflés par des ventilateurs spéciaux. Les principales données du transformateur ОДТГ-90 000/400 sont : puissance — 90 000



Transformateur à cuve tubulaire (TM-320/6) *Transformateur à cuve à radiateurs (TM-5600/35)*

Fig. 211. Transformateurs dans l'huile à ventilation naturelle

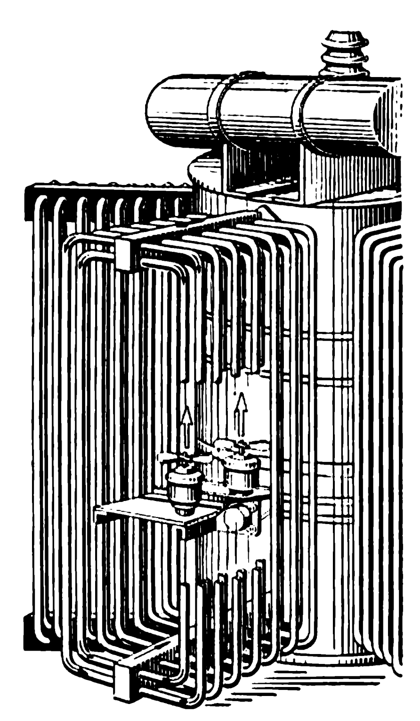


Fig. 212. Transformateur à bain d'huile à soufflage par l'air

kVA ; tensions nominales — 400/110/11 kV ; poids total — 335 tonnes ; longueur — 11,27 m, largeur — 7,61 m, hauteur — 12 m.

Les transformateurs ОДТГ-90 000/400 sont installés dans les sous-stations de la ligne de transport Kouïbychev-Moscou. La puissance d'un groupe de trois transformateurs monophasés de ce type est de 270 000 kVA.

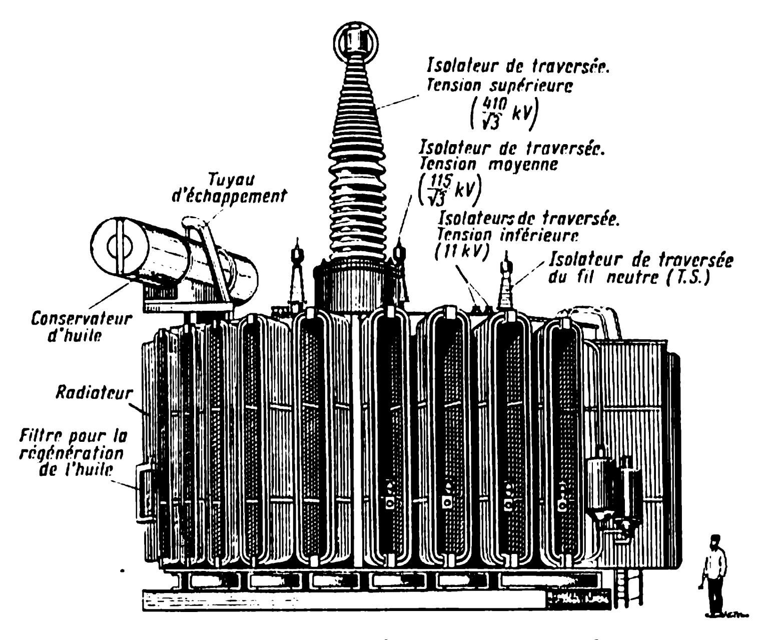


Fig. 213. Transformateur monophasé à trois enroulements

Désignation des types de transformateurs de puissance

О — monophasé ;

Т — triphasé ;

С — à refroidissement par l'air (sec) ;

М — à bain d'huile à refroidissement naturel par l'air ;

Д — à bain d'huile avec refroidissement forcé par l'air (soufflage) ;

Т — à trois enroulements (comportant un enroulement primaire et deux enroulements secondaires par phase) ;

Г — résistant à la foudre (dont l'isolation est protégée contre le percement en cas d'un coup de foudre) ;

У — étanche.

Les chiffres après les lettres désignent : le premier chiffre (dans le numérateur) indique la puissance en kVA, le second chiffre (dans le dénominateur) indique la tension primaire nominale en kV.

Exemples:

TC-320/10 — transformateur triphasé refroidi à l'air (sec) de 320 kVA de puissance, tension primaire — 10 kV;

TM-5600/35 — transformateur triphasé dans l'huile avec refroidissement naturel par l'air, de 5600 kVA, 35 kV;

TMУ-50/6 — transformateur triphasé dans l'huile étanche, de 50 kVA, 6 kV;

ОДТГ-90 000/400 — transformateur monophasé dans l'huile avec refroidissement par l'air (soufflage), à trois enroulements, résistant à la foudre, de 90 000 kVA, 400 kV.

§ 114. TRANSFORMATEURS TRIPHASÉS

Pour transformer le courant triphasé on peut utiliser des transformateurs monophasés. La figure 214 schématise le couplage de trois transformateurs monophasés branchés

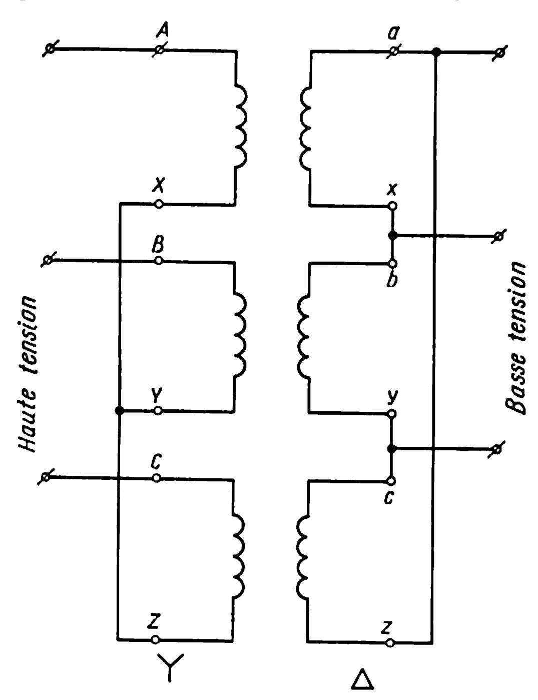


Fig. 214. Utilisation des transformateurs monophasés dans les réseaux triphasés

sur un réseau à courant triphasé. Ce schéma présente le défaut de nécessiter de grandes quantités de fer à transformateurs pour les noyaux des trois appareils.

Si on réunit le fer des trois noyaux pour former un circuit magnétique commun, on obtient la carcasse d'un transformateur triphasé. La quantité de fer nécessaire pour un

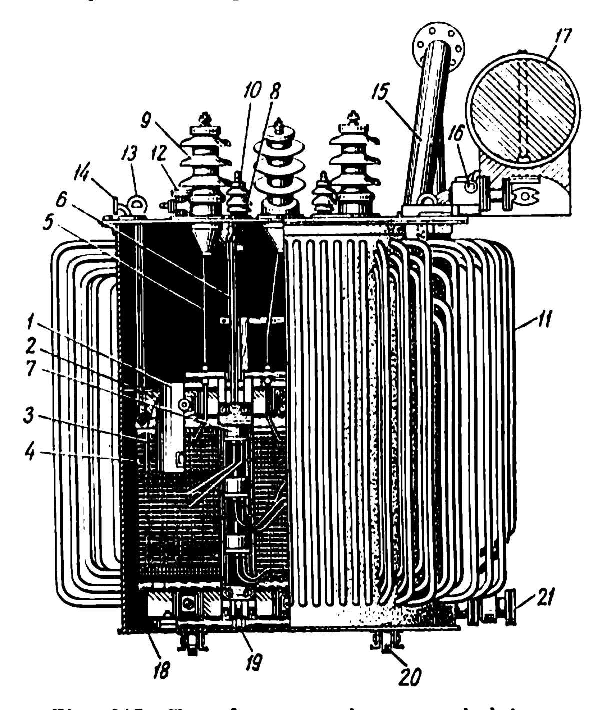


Fig. 215. Transformateur à cuve tubulaire:

1 — circuit magnétique feuilleté; *2* — poutrelles en U serrant la culasse; *3* — enroulement basse tension (BT); *4* — enroulement haute tension (HT); *5* — prises HT; *6* — prises BT; *7* — commutateur incorporé des prises de réglage de l'enroulement HT; *8* — commande du commutateur; *9* — borne (isolateur) HT; *10* — borne (isolateur) BT; *11* — cuve tubulaire; *12* — robinet pour le versement de l'huile; *13* — anneau de levage de la partie active; *14* — pipe pour connexion d'une pompe à vide; *15* — tuyau d'échappement; *16* — relais Buchholz; *17* — conservateur d'huile; *18* — équerre de butée sur le fond de la cuve; *19* — goujon vertical réunissant les poutrelles en U qui serrent les culasses; *20* — galet de translation; *21* — robinet de vidange de l'huile

transformateur triphasé est de beaucoup inférieure à celle requise pour trois transformateurs monophasés. Sur la figure 215 on voit un transformateur de puissance triphasé avec refroidissement naturel par l'huile.

Les schémas des connexions normalisées des enroulements des transformateurs triphasés sont représentés par la fi-

	Schémas des connexions des enroulements		Diagrammes des vecteurs		Symboles de couplages
	HT	BT	HT	BT	
a)	A B C X Y Z	0 a b c x y z	B A C	b a c	Y/Y_0 - 12
b)	A B C X Y Z	a b c x y z	B A C	b c a	Y/Δ - 11
c)	0 A B C X Y Z	a b c x y z	B A C	b c a	Y_0/Δ - 11

Fig. 216. Schéma des connexions des enroulements des transformateurs triphasés:

a — étoile-étoile à neutre sortie; *b* — étoile-triangle; *c* — étoile à neutre sortie-triangle

gure 216. La disposition des sorties sur le couvercle du transformateur (vue en plan) est indiquée sur la figure 217.

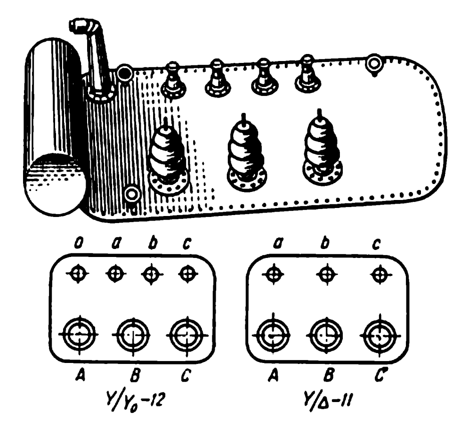


Fig. 217. Sortie des extrémités des enroulements sur le couvercle du transformateur (en haut — vue d'ensemble du couvercle avec les sorties, en bas — disposition des sorties)

Les schémas de disposition des enroulements des transformateurs triphasés pour deux groupes de couplage sont indiqués sur la figure 218.

Les désignations Y/Y_0 — 12 et Y/Δ — 11 indiquent les schémas et les groupes de couplage des enroulements des transformateurs:

Y — couplage en étoile;
Y_0 — couplage en étoile avec neutre sortie;
Δ — couplage en triangle.

Les fils d'entrée des enroulements de phase haute tension sont désignés par les lettres A, B, C et ceux de basse tension par les lettres a, b, c. Les fils de sortie des enroulements de phase sont respectivement désignés par les lettres X, Y, Z et x, y, z.

Dans le symbole Y/Δ — 11 la première lettre Y montre que l'enroulement haute tension est couplé en étoile. La

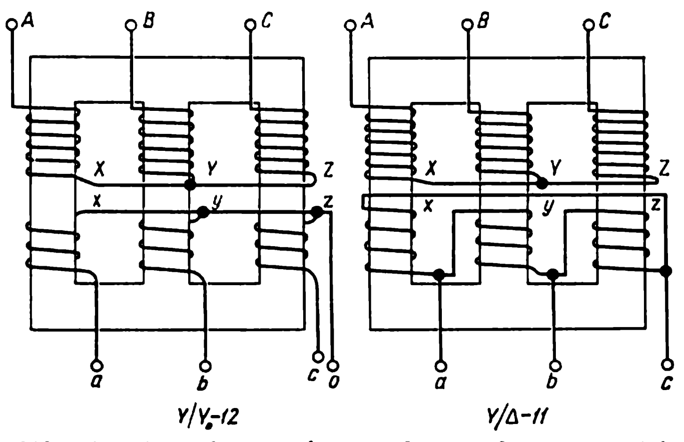


Fig. 218. Disposition des enroulements des transformateurs triphasés

deuxième lettre Δ montre que l'enroulement basse tension est couplé en triangle. Les nombres 11 et 12 indiquent le déplacement angulaire des vecteurs des tensions composées des enroulements haute et basse tensions. Ce déplacement correspond à l'angle de décalage dans le sens horaire entre les vecteurs des tensions composées des enroulements primaire et secondaire en adoptant comme unité d'angle l'angle 30°. Par exemple, pour un angle de déplacement de 330°, l'indice numérique de couplage sera 330 : 30 = 11.

§ 115. COUPLAGE DES TRANSFORMATEURS EN PARALLÈLE

Si la puissance qui doit être transformée est supérieure à celle d'un transformateur, on peut coupler en parallèle plusieurs transformateurs.

Couplage en parallèle des transformateurs monophasés. Pour coupler en parallèle des transformateurs monophasés il faut assurer les conditions suivantes.

1. Les tensions des enroulements primaires et secondaires des transformateurs que l'on veut coupler en parallèle doivent être respectivement égales. Dans ce cas, les rapports de transformation seront aussi égaux. Cette condition peut être inscrite de façon suivante:

$$U_{1I} = U_{1II};$$
$$U_{2I} = U_{2II};$$
$$k_I = k_{II}.$$

Si on branche en parallèle des transformateurs à différents rapports de transformation leurs F.É.M. secondaires seront inégales. Mais, sur les barres secondaires on ne peut pas avoir deux tensions différentes. Pour cette raison, la différence de F.É.M. E engendrera dans le circuit fermé des enroulements secondaires un courant appelé *courant compensateur*. Lorsque la différence entre les rapports de transformation est grande, le courant compensateur peut être tellement grand que le fonctionnement en parallèle de tels transformateurs sera impossible.

Lorsque des transformateurs à différents rapports de transformation couplés en parallèle sont mis en charge, leurs enroulements seront parcourus par un courant égal à la somme géométrique du courant de charge et du courant compensateur. Le calcul montre que dans ce cas le transformateur à rapport de transformation plus petit sera plus chargé. Pour éviter un échauffement excessif il faut réduire la charge extérieure et mettre le transformateur surchargé dans des conditions de fonctionnement normales. Le transformateur à plus grand rapport de transformation sera sous-chargé. En pratique, on est parfois obligé à coupler en parallèle des transformateurs à différents rapports de transformation.

Selon la norme soviétique on peut coupler en parallèle des transformateurs lorsque la différence entre les rapports de transformation ne dépasse pas 0,5%.

2. La deuxième condition nécessaire pour pouvoir coupler les transformateurs en parallèle est l'égalité des tensions de court-circuit. Le calcul montre que lors du couplage en parallèle des transformateurs à rapports de transformation

identiques et à puissances égales, mais à différentes tensions de court-circuit U_{cc}, la charge (le courant ou la puissance apparente) sera répartie entre les transformateurs en raison inverse de U_{cc}: le transformateur à U_{cc} plus grande sera chargé moins.

En pratique, on admet le couplage en parallèle des transformateurs lorsque leurs tensions de court-circuit ne

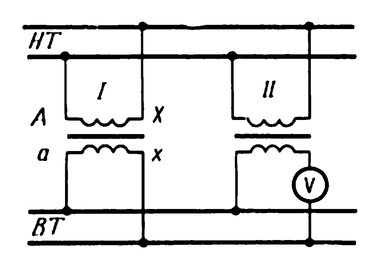


Fig. 219. Couplage en parallèle des transformateurs monophasés

diffèrent pas plus de ±10 % de leur valeur moyenne. Les puissances des transformateurs ne doivent pas différer de plus de trois fois.

3. La troisième condition de couplage en parallèle des transformateurs est le branchement des mêmes phases aussi bien du côté haute tension que du côté basse tension.

Cette dernière condition est vérifiée en pratique de façon suivante.

Admettons qu'il faut brancher en parallèle avec le transformateur monophasé en marche *I* (fig. 219) le transformateur monophasé *II*. On branche le transformateur *II* du côté haute tension et on connecte l'une de ses bornes de l'enroulement secondaire à une barre quelconque basse tension. Entre la seconde borne de l'enroulement secondaire du transformateur *II* et la seconde barre de basse tension on branche un voltmètre prévu pour la double basse tension des transformateurs. On peut brancher en parallèle les deux transformateurs seulement lorsque le voltmètre indique zéro.

Couplage en parallèle des transformateurs triphasés. Pour brancher en parallèle des transformateurs triphasés il faut assurer les mêmes conditions que pour le couplage des transformateurs monophasés. La condition complémentaire et obligatoire pour le couplage des transformateurs triphasés est l'observation des mêmes groupes de couplage.

Cela signifie qu'un transformateur à groupe de couplage $Y/Y_0 - 12$ peut fonctionner en parallèle seulement avec un transformateur de même groupe $Y/Y_0 - 12$.

§ 116. AUTOTRANSFORMATEURS

L'autotransformateur (fig. 220) est un transformateur dont la carcasse ne porte qu'un seul enroulement. Aux différents points de cet enroulement sont connectés le circuit primaire et le circuit secondaire. Le flux magnétique de

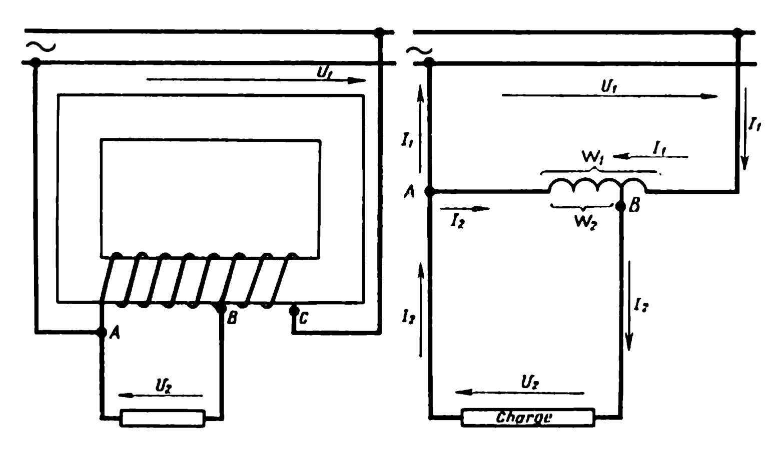


Fig. 220. Constitution schématique des autotransformateurs

l'autotransformateur induit une force électromotrice dans l'enroulement. Cette force électromotrice E est presque égale à la tension U_1 appliquée à l'autotransformateur.

Si la F.É.M. induite dans un enroulement comportant w_1 spires est égale à E, la F.É.M. dans une spire sera

$$\frac{E}{w_1} \text{ ou approximativement } \frac{U_1}{w_1}.$$

Admettons que le circuit primaire de l'autotransformateur (fig. 220) soit alimenté sous une tension $U_1 = 800$ V. Le nombre total de spires de l'enroulement de l'autotransformateur entre les points A et C auxquels est connecté le circuit primaire est 200. Calculons la valeur de la F.É.M. par spire:

$$\frac{U_1}{w_1} = \frac{800}{200} = 4 \text{ V}.$$

Si l'on veut obtenir dans le circuit secondaire une tension U_2 de 600 V, on peut trouver dans l'enroulement deux points entre lesquels la tension sera de 600 V.

Si dans une spire de l'enroulement sont induits 4 V, le nombre de spires nécessaire pour obtenir 600 V sera:

$$w_2 = 600 : 4 = 150 \text{ spires.}$$

En comptant 150 spires depuis l'entrée (point A) de l'enroulement, nous connectons le circuit secondaire entre les points A et B.

On peut noter que

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

c'est-à-dire que nous obtenons la même formule que nous avions pour un transformateur ordinaire. Le rapport de transformation sera toujours:

$$k = \frac{U_1}{U_2}.$$

Exemple 6. L'enroulement d'un autotransformateur comportant $w_1 = 1200$ spires est branché sur un réseau dont la tension $U_1 = 500$ V. Quelle est la tension qu'on peut obtenir dans le circuit secondaire si entre les extrémités de ce dernier sont branchées 900 spires?

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

$$U_2 = \frac{U_1 w_2}{w_1} = \frac{500 \cdot 900}{1200} = 375 \text{ V}.$$

Sous l'influence de la tension U_1 l'enroulement primaire de l'autotransformateur comportant w_1 spires est parcouru par un courant I_1 (fig. 220). La tension aux bornes du circuit secondaire est égale à U_2. Lorsque le circuit secondaire est fermé, il est parcouru par un courant I_2. Comme tout courant induit, le courant I_2 est dirigé, selon la loi de Lenz, de façon qu'il s'oppose à la cause qui l'a provoqué, c'est-à-dire en sens opposé à celui du courant I_1.

Il en résulte que la partie $A - B$, commune aux enroulements primaire et secondaire, est parcourue par la différence géométrique des courants I_1 et I_2.

Dans les calculs approchés on remplace la différence géométrique par la différence arithmétique et on écrit:

$$I = I_2 - I_1.$$

Le rendement d'un autotransformateur est très élevé et pratiquement on peut considérer que la puissance du circuit primaire est égale à celle du circuit secondaire.

Exemple 7. Un autotransformateur est branché sur un réseau à tension $U_1 = 400$ V. Le courant $I_1 = 30$ A. Dans le circuit secondaire la tension $U_2 = 300$ V. On demande de calculer le courant I_2 (fig. 220).

Calculons d'abord la puissance du circuit primaire S_1:

$$S_1 = I_1 U_1 = 30 \cdot 400 = 12\,000 \text{ VA} = 12 \text{ kVA}.$$

En négligeant les faibles pertes dans l'autotransformateur on obtient la puissance du circuit secondaire qui est égale à 12 kVA. A condition que le circuit secondaire ne contienne pas d'inductance, le courant I_2 est:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{12\,000}{300} = 40 \text{ A}.$$

Dans la partie commune des spires $A - B$ circule la différence des courants I_2 et I_1:

$$I = I_2 - I_1 = 40 - 30 = 10 \text{ A}.$$

Par conséquent, dans la portion $A - B$ la section du fil de l'enroulement peut être inférieure à celle dans le reste de l'enroulement. Dans ces conditions, un transformateur ordinaire destiné à abaisser la tension de 400 V à 300 V aurait deux enroulements, c'est-à-dire qu'il exigerait une plus grande quantité de cuivre et son prix serait plus élevé.

Si dans l'exemple considéré la tension secondaire U_2 est de 350 V au lieu de 300 V, c'est-à-dire ne diffère pas beaucoup de la tension primaire, le courant secondaire sera:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{12\,000}{350} = 34{,}3 \text{ A}.$$

Dans ce cas dans la portion $A - B$ circulera un courant encore plus petit

$$I = I_2 - I_1 = 34{,}3 - 30 = 4{,}3 \text{ A}$$

et la section du fil dans la portion $A - B$ de l'enroulement peut être encore plus petite. On peut en déduire que moins la tension secondaire diffère de la tension primaire, plus grand est l'avantage que présente un autotransformateur par rapport à un transformateur ordinaire.

Admettons que la tension secondaire U_2 soit de 200 V au lieu de 300 V. Maintenant elle est deux fois plus petite que la tension primaire. Le courant secondaire sera:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{12\,000}{200} = 60 \text{ A}.$$

Le courant dans la portion $A - B$ sera:

$$I = I_2 - I_1 = 60 - 30 = 30 \text{ A},$$

c'est-à-dire qu'il est de même intensité que le courant I_1. La section du fil de l'enroulement entier doit donc être la même.

Réduisons encore la tension secondaire U_2 jusqu'à 100 V. Maintenant elle diffère de plus de deux fois par rapport à la tension primaire :

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{12\,000}{100} = 120 \text{ A}.$$

Le courant dans la portion $A - B$ dans ce cas sera :

$$I = I_2 - I_1 = 120 - 30 = 90 \text{ A}.$$

Il faudra donc augmenter la section du fil dans la portion $A - B$ par rapport à la portion $B - C$. Dans ce cas il peut être plus avantageux d'utiliser un transformateur ordinaire.

Exemple 8. Un autotransformateur a un enroulement comprenant 1500 spires qui est branché sur un réseau de 500 V. Le circuit secondaire comporte 1200 spires et est branché sur une résistance non inductive de 100 ohms. Calculer le courant absorbé par l'autotransformateur lorsque son rendement est de 95%. Déterminer les courants pour lesquels doivent être calculées les portions $A - B$ et $B - C$ (fig. 220).

On trouve la tension secondaire U_2 d'après la formule :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

d'où

$$U_2 = \frac{U_1 w_2}{w_1} = \frac{500 \cdot 1200}{1500} = 400 \text{ V}.$$

Le courant secondaire sera :

$$I_2 = \frac{U_2}{r} = \frac{400}{100} = 4 \text{ A}.$$

La puissance du circuit secondaire lorsque $\cos \varphi_2 = 1$ est

$$P_2 = I_2 \cdot U_2 = 4 \cdot 400 = 1600 \text{ W}.$$

La puissance du circuit primaire en tenant compte du rendement de l'autotransformateur :

$$P_1 = \frac{P_2}{\text{rendement}} = \frac{1600}{0,95} \approx 1685 \text{ W}.$$

Le courant du circuit primaire absorbé par l'autotransformateur :

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{1685}{500} = 3,37 \text{ A}.$$

Le courant dans la portion $B - C$ est égal à 3,37 A et dans la portion $A - B$:

$$I = I_2 - I_1 = 4 - 3,37 = 0,63 \text{ A}.$$

En plus des autotransformateurs abaisseurs on construit également des autotransformateurs élévateurs (fig. 221). Dans ces derniers la tension secondaire U_2 est supérieure

à la tension primaire U_1 et le courant dans la portion commune des enroulements est (approximativement)

$$I = I_1 - I_2.$$

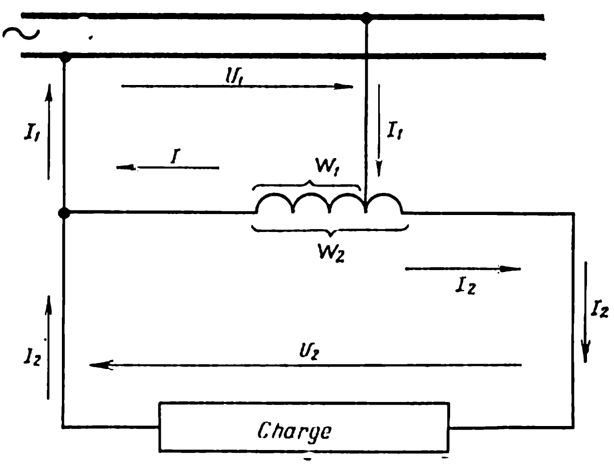


Fig. 221. Autotransformateur élévateur

Le rapport de transformation d'un autotransformateur élévateur est toujours inférieur à l'unité:

$$k = \frac{U_1}{U_2}.$$

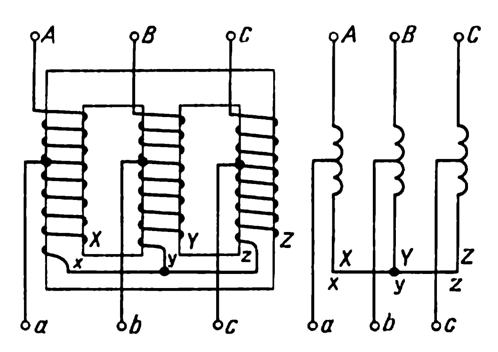


Fig. 222. Autotransformateur triphasé: à gauche — organisation schématique, à droite — schéma électrique

Dans les réseaux triphasés on utilise des autotransformateurs triphasés (fig. 222).

Les autotransformateurs sont employés là où l'écart entre la tension primaire et la tension secondaire est petit, c'est-à-dire lorsque le rapport de transformation est voisin de l'unité et en tout cas ne dépasse pas 2. Dans ces cas, les autotransformateurs reviennent meilleur marché que les transformateurs ordinaires. Ils sont également plus légers et plus économiques. Mais lorsque la tension secondaire diffère considérablement de la tension primaire, l'autotransformateur perd ses avantages en ce qui concerne l'économie en métal et la sécurité. Puisque dans l'autotransformateur les circuits des enroulements de haute et de basse tensions sont réunis électriquement, l'isolement du circuit de basse tension doit être le même que celui du circuit de haute tension.

Problèmes

1. Un transformateur monophasé est branché sur un réseau de 220 V. Son enroulement primaire comporte 800 spires et le secondaire en comporte 46. Calculer le rapport de transformation et la tension secondaire.

2. L'enroulement secondaire du transformateur indiqué dans le problème précédent fournit un courant de 8 A alimentant des lampes à incandescence. Calculer le courant demandé par le transformateur au réseau, si son rendement est de 90%.

3. Une bobine, dont la résistance ohmique est de 3 ohms et la réactance de 20 ohms est connectée aux bornes d'un transformateur fournissant 24 V. Le transformateur est branché sur un réseau de 120 V ; son rendement est de 92 %. Calculer le courant demandé par le transformateur au réseau.

4. L'enroulement secondaire d'un transformateur triphasé fournit une puissance de 30 kVA ; le rendement du transformateur est de 95 % et il est branché sur un réseau de 3000 V. Déterminer le courant qui circule dans l'enroulement primaire.

5. L'enroulement d'un autotransformateur abaisseur monophasé comporte 800 spires et est branché sur une tension de 450 V. En quel endroit faut-il faire une dérivation pour le circuit secondaire afin d'abaisser la tension jusqu'à 300 V ?

6. La puissance utile de l'autotransformateur indiqué dans le problème précédent est de 2 kW, son rendement est de 93 %. Calculer le courant primaire et le courant circulant dans la partie commune de l'enroulement.

7. Un autotransformateur dont le rendement est de 96 % est branché sur un réseau de 120 V. Dans son circuit secondaire débitant dans un récepteur non inductif circule un courant de 8 A sous la tension de 150 V. Déterminer les courants dans le circuit primaire et dans la partie commune de l'enroulement.

Questions de contrôle

1. Quel est le principe de fonctionnement d'un transformateur ?
2. Comment est constitué un transformateur ?
3. Quel est le rôle des transformateurs ?
4. Qu'est-ce que le rapport de transformation d'un transformateur et comment peut-on le déterminer?
5. Comment classe-t-on les transformateurs en fonction de la construction du circuit magnétique et du mode de refroidissement ?
6. Comment couple-t-on les enroulements des transformateurs triphasés ?
7. Pourquoi le courant primaire augmente-t-il lorsque la charge du transformateur croît ?
8. Expliquer l'organisation, le fonctionnement et la destination des autotransformateurs.

CHAPITRE X

MOTEURS ASYNCHRONES

§ 117. GÉNÉRALITÉS

On appelle machine asynchrone une machine à courant alternatif dont la vitesse de rotation du rotor est inférieure à celle du champ magnétique du stator et dépend de la charge. Une machine asynchrone, de même que d'autres machines électriques, est réversible, c'est-à-dire qu'elle peut marcher en moteur et en générateur.

Le moteur asynchrone triphasé a été inventé par l'ingénieur russe M. Dolivo-Dobrovolski, en 1890, et, après perfectionnements, a trouvé un large emploi.

Le moteur asynchrone comprend deux parties principales: un stator et un rotor. On appelle *stator* la partie fixe de la machine. A l'intérieur du stator sont ménagées les encoches dans lesquelles on place un enroulement triphasé alimenté en courant triphasé. La partie tournante de la machine est appelée *rotor* et ses encoches comportent également un enroulement. Le stator et le rotor sont faits en tôles découpées d'acier magnétique de 0,35 ou 0,5 mm d'épaisseur. Les tôles sont isolées l'une de l'autre par une couche de vernis. L'entrefer séparant le stator et le rotor est fait aussi petit que possible (0,3 à 0,35 mm dans les machines de faible puissance et 1 à 1,5 mm dans les machines de grande puissance).

Selon la construction du rotor, les moteurs asynchrones sont à rotor en court-circuit ou à rotor bobiné.

Les moteurs asynchrones se classent en moteurs *sans collecteur* et en moteurs *à collecteur*. Les moteurs sans collecteur sont les plus répandus. On les utilise là où on a besoin d'une vitesse de rotation à peu près constante sans réglage. Les moteurs sans collecteur sont de construction simple, sûrs en fonctionnement et possèdent un rendement élevé.

Pour pouvoir régler largement la vitesse et doter la machine asynchrone de certaines propriétés spéciales on utilise des moteurs asynchrones monophasés et triphasés à collecteur. Mais étant donné leur prix élevé, leur construc-

tion compliquée et les conditions difficiles de fonctionnement ils sont peu utilisés et nous ne les examinerons pas dans cet ouvrage. Pour cette raison, en parlant des moteurs asynchrones, nous aurons en vue les moteurs sans collecteur.

§ 118. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE

Connectons l'enroulement statorique du moteur au réseau triphasé. A l'intérieur du stator prend naissance un champ magnétique tournant. Les lignes d'induction du champ couperont l'enroulement du rotor immobile et y induiront une F.É.M. E_2 dont la fréquence f_2 est égale à celle du courant f_1 dans l'enroulement statorique.

La F.É.M. induite dans une phase de l'enroulement rotorique est déterminée d'après la formule:

$$E_{2g} = 4{,}44 k_2 f_2 w_2 \Phi_m,$$

où $k_2 < 1$ est le coefficient de bobinage qui tient compte de la diminution de la F.É.M. du rotor par suite de la composition géométrique des F.É.M. induites dans ses fils séparés et du raccourcissement du pas d'enroulement rotorique;

f_2 est la fréquence du courant dans l'enroulement rotorique;

w_2 est le nombre de spires de l'enroulement d'une phase du rotor;

Φ_m est la valeur maximale du flux magnétique du stator.

Sous l'action de la F.É.M. E_{2g} dans l'enroulement rotorique circulera un courant I_2 dont la valeur peut être déterminée par la formule:

$$I_2 = \frac{E_{2g}}{z_{2g}} = \frac{E_{2g}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2g}^2}},$$

où r_2 est la résistance ohmique de l'enroulement de phase du rotor;

x_{2g} est la réactance de fuites d'une phase de l'enroulement rotorique.

La réactance de fuites x_{2g} dépend de la fréquence du courant et est déterminée par la formule:

$$x_{2g} = 2\pi f_2 L_{2g},$$

où L_{2g} est l'inductance de fuites d'une phase de l'enroulement rotorique.

A l'instant du démarrage, lorsque le rotor est encore immobile, la fréquence du courant dans l'enroulement rotorique est maximale ($f_2 = f_1$) et, pour cette raison, la réactance d'induction x_{2g} est maximale. Puisque la F.É.M. E_2 induite dans l'enroulement rotorique à l'instant du démarrage est maximale, le courant I_2 dans l'enroulement rotorique est à cet instant 2 à 7 fois supérieur au courant nominal du moteur. Des forces électromagnétiques s'exercent entre les courants du rotor et le champ tournant du stator. Ce sont ces forces qui créent un couple moteur sous l'action duquel le rotor commence à tourner dans le sens de rotation du champ statorique. C'est le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone.

Il est évident que le rotor ne peut pas rattraper le champ magnétique tournant du stator. Si l'on suppose que le rotor a la même vitesse de rotation que le champ du stator, les courants dans l'enroulement rotorique disparaîtront. Avec la disparition des courants dans l'enroulement du rotor leur interaction avec le champ statorique cessera et le rotor commencera à tourner plus lentement que le champ du stator. Mais l'enroulement du rotor sera de nouveau coupé par le champ tournant du stator et le rotor sera de nouveau soumis au couple moteur. Il en résulte que le rotor en tournant doit toujours retarder sur la vitesse de rotation du champ magnétique du stator, c'est-à-dire tourner de façon asynchrone et c'est pour cette raison que ces moteurs sont appelés moteurs *asynchrones*. Vu qu'ils fonctionnent grâce à des courants induits dans le rotor, on les nomme aussi moteurs d'induction.

Si on désigne par n_1 la vitesse de rotation du champ tournant du stator (vitesse de synchronisme) et par n_2 la vitesse de rotation du rotor, la vitesse de ce dernier par rapport à celle du champ tournant du stator sera égale à la différence

$$n_1 - n_2.$$

Le rapport dans lequel la vitesse relative du rotor est inférieure à celle du champ du stator est appelé ***glissement du moteur*** et est désigné par la lettre g.

De cette façon le glissement est:

$$g = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

d'où

$$n_2 = n_1 (1 - g).$$

Si, par exemple, le champ magnétique tourne à 1500 tr/mn et le rotor à 1450 tr/mn, le glissement est :

$$g = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0{,}033 = 3{,}3\ \%.$$

Au décollage du moteur, lorsque sa vitesse $n_2 = 0$, le glissement est :

$$g = \frac{n_1}{n_1} = 1, \text{ ou } 100\ \%.$$

Lors de la marche à vide, $n_2 \approx n_1$ et, pour cette raison, le glissement est :

$$g = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \approx 0.$$

Le glissement d'un moteur asynchrone varie peu en fonction de la charge. Plus la puissance du moteur est grande plus son glissement est petit.

Exemple. Calculer le glissement d'un moteur asynchrone hexapolaire dont le rotor tourne à 960 tr/mn.

$$n_1 = \frac{f_1 60}{p}.$$

Si $f_1 = 50$ Hz, on a

$$n_1 = \frac{50 \cdot 60}{3} = 1000 \text{ tr/mn},$$

et le glissement :

$$g = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0{,}04 \text{ ou } 4\ \%.$$

Ainsi, la vitesse d'une machine asynchrone fonctionnant en moteur varie de $n = 0$ (instant du décollage) à $n \approx n_1$ (marche à vide) et le glissement passe de $g = +1$ à $g = 0$.

Pour une charge nominale d'un moteur de faible puissance, le glissement est compris entre 3 % et 6 % et celui des moteurs de grande puissance entre 1 % et 3 %.

Avec la variation de la vitesse du moteur la fréquence de la F.É.M. et des courants dans l'enroulement rotorique change comme on le voit d'après l'équation :

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = \frac{pn_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 g.$$

Au démarrage du moteur :

$$g = 1\,; \quad f_2 = f_1.$$

En marche à vide :

$$g \approx 0\,; \quad f_2 \approx 0.$$

Par exemple, si $f_1 = 50$ Hz, lors du démarrage $f_2 = 50$ Hz. Pour un glissement $g = 2$ % la fréquence du courant dans le rotor :

$$f_2 = f_1 g = 50 \cdot 0{,}02 = 1 \text{ Hz}.$$

La valeur de la F.É.M. induite dans l'enroulement rotorique, comme nous l'avons déjà indiqué plus haut, est :

$$E_{2g} = 4{,}44 f_2 w_2 k_2 \cdot \Phi_m.$$

Puisque $f_2 = f_1 g$, la valeur de la F.É.M. E_{2g} pour un glissement déterminé est donnée par la formule :

$$E_{2g} = 4{,}44 f_1 g w_2 k_2 \cdot \Phi_m = E_2 g,$$

où E_2 est la F.É.M. dans une phase de l'enroulement rotorique au moment du démarrage (lorsque $f_2 = f_1$).

La réactance d'induction dépendant de la fréquence s'exprime pour un glissement déterminé g par la formule :

$$x_{2g} = 2\pi f_2 L_{2g} = 2\pi f_1 g L_{2g},$$

où $2\pi f_1 g L_{2g}$ est la réactance de l'enroulement rotorique à l'instant du démarrage.

Après avoir examiné le fonctionnement d'un moteur asynchrone comparons-le à un transformateur. Le transformateur et le moteur possèdent chacun deux enroulements entre lesquels existe un couplage magnétique. Le rôle de l'enroulement primaire du transformateur est joué dans le moteur par l'enroulement statorique et le rôle de l'enroulement secondaire est joué par l'enroulement rotorique. A l'instant du démarrage (ou lorsque le rotor est freiné), les deux enroulements sont immobiles et la fréquence du courant dans les deux enroulements est la même. La variation du régime de fonctionnement de l'enroulement secondaire d'un transformateur influe sur le fonctionnement de son enroulement primaire. On observe la même chose lors du fonctionnement d'un moteur asynchrone.

L'accroissement de la charge sur l'arbre du moteur provoque l'accroissement du courant dans l'enroulement

rotorique. Grâce au couplage magnétique entre les enroulements rotorique et statorique, un accroissement du courant dans l'enroulement rotorique provoque un accroissement du courant dans l'enroulement statorique. Un ampèremètre branché dans le circuit statorique permet donc de juger de la charge du moteur.

La différence entre un moteur asynchrone et un transformateur réside dans la construction du circuit magnétique. Dans un moteur, les circuits primaire et secondaire sont séparés par un entrefer qui est absent dans les transformateurs de construction courante. Lors du fonctionnement du moteur le rotor avec son enroulement tourne. La fréquence de la F.É.M. et du courant rotorique varie avec la charge du moteur, ce qui n'a pas lieu dans un transformateur.

§ 119. COUPLE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE

Le déphasage entre le courant I_2 et la F.É.M. E_{2g} du rotor influe beaucoup sur la valeur du couple d'un moteur asynchrone.

Examinons un cas où l'inductance de l'enroulement rotorique est faible et on peut négliger le déphasage (fig. 223, *a*). Le champ magnétique tournant du stator y est remplacé par le champ des pôles *N* et *S* qui tournent, par exemple, dans le sens horaire. En nous servant de la règle de la main droite, nous déterminons le sens de la F.É.M. et des courants dans l'enroulement rotorique. L'interaction des courants rotoriques et du champ tournant produit un couple moteur. Le sens des forces agissant sur les conducteurs parcourus par un courant est déterminé d'après la règle de la main gauche. Comme on le voit sur la figure, le rotor, sous l'action de ces forces, tourne dans le même sens que le champ tournant, c'est-à-dire dans le sens horaire.

Examinons un deuxième cas où l'inductance de l'enroulement est grande. Dans ce cas, le déphasage entre le courant rotorique I_2 et la F.É.M. rotorique E_{2g} est également grand. Sur la figure 223, *b*, le champ magnétique du stator d'un moteur asynchrone est indiqué, comme dans le cas précédent, sous forme de pôles *N* et *S* tournant dans le sens horaire. Le sens de la F.É.M. induite dans l'enroulement rotorique reste le même que sur la figure 223, *a*, mais par suite du déphasage du courant en arrière, l'axe du champ magnétique du rotor ne coïncide pas avec la ligne neutre du champ

statorique. Cette fois il est décalé d'un certain angle dans le sens opposé à celui de rotation du champ magnétique. Il en résulte que simultanément avec la formation d'un couple moteur dirigé dans un sens, certains conducteurs créent un couple moteur opposé.

On voit donc que le couple total du moteur, lorsqu'il existe un déphasage entre le courant et la F.É.M. du rotor,

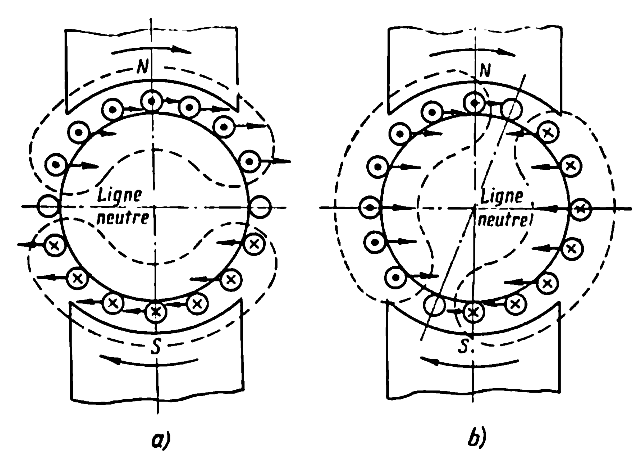


Fig. 223. Couple moteur en fonction du déphasage entre le courant et la F.É.M. du rotor

est plus petit qu'au cas où I_2 et E_{2g} sont en phase. On peut démontrer que le couple d'un moteur asynchrone est dû seulement à la composante active du courant rotorique, c'est-à-dire au courant $I_2 \cos \psi_2$ et qu'il peut être calculé par la formule:

$$C_{\text{mot}} = c\Phi_m I_2 \cos \psi_2,$$

où

$$I_2 = \frac{E_{2g}}{z_{2g}};$$

$$\cos \psi_2 = \frac{r_2}{z_{2g}};$$

Φ_m est le flux magnétique du stator (approximativement égal au flux résultant du moteur asynchrone);

ψ_2 est l'angle de déphasage entre la F.É.M. et le courant dans l'enroulement rotorique;

c est un coefficient constant.

Après substitution, on a :

$$C_{\text{mot}} = c\Phi_m \frac{E_{2g}}{z_{2g}} \cdot \frac{r_2}{z_{2g}} = c_1\Phi_m \frac{E_{2g} r_2}{z_{2g}^2} .$$

Mais puisque

$$z_{2g}^2 = r_2^2 + (2\pi f_2 L_{2g})^2 = r_2^2 + (2\pi g f_1 L_{2g})^2,$$

on peut écrire la formule du couple sous sa forme définitive suivante :

$$C_{\text{mot}} = c_2 \frac{g r_2}{r_2^2 + (2\pi f_1 g L_{2g})^2} .$$

Cette dernière expression montre que le couple moteur dépend du glissement.

Sur la figure 224, la courbe A représente la variation du couple moteur en fonction du glissement. On voit qu'à l'instant du démarrage, lorsque $g = 1$ et $n = 0$, le couple

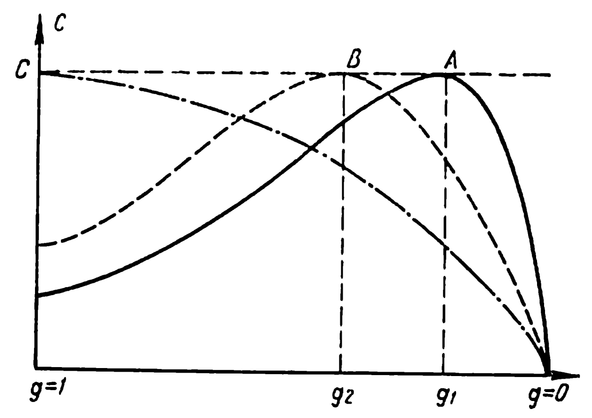


Fig. 224. Variation du couple moteur en fonction du glissement

moteur est petit. Cela s'explique par le fait qu'à l'instant du démarrage la fréquence du courant dans l'enroulement rotorique est maximale et la réactance de l'enroulement est grande. Pour cette raison, le cos ψ_2 est faible (0,1 à 0,2), et nonobstant la grande intensité du courant de décollage le couple de démarrage est donc petit.

Pour un certain glissement g_1 le couple moteur sera maximal. Avec la diminution du glissement ou, autrement dit, avec l'accroissement de la vitesse du moteur, son couple

diminue rapidement et, pour un glissement $g = 0$, le couple moteur est également nul.

Il est à noter que dans un moteur asynchrone le glissement ne peut pas être nul. Cela n'est possible qu'au cas où l'on imprime au rotor de l'extérieur un couple moteur dirigé dans le sens de rotation du champ statorique.

On peut augmenter le couple de démarrage si à l'instant de démarrage on diminue le déphasage entre le courant et la F.É.M. du rotor. La formule

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x_{2g}}{r_2}$$

montre que lorsqu'on augmente la résistance ohmique, la réactance de l'enroulement rotorique étant constante, tg ψ_2 et l'angle ψ_2 diminueront, et le cos ψ_2 ainsi que le couple moteur augmenteront.

On utilise ce phénomène pour augmenter la valeur du couple de démarrage. A l'instant du démarrage, on introduit dans le circuit rotorique une résistance ohmique (un rhéostat de démarrage) que l'on court-circuite lorsque le moteur aura augmenté sa vitesse.

Le résultat de l'accroissement du couple de démarrage est que l'on obtient le couple moteur maximal pour un glissement plus grand (point g_2 de la courbe B sur la fig. 224). En augmentant la résistance ohmique du circuit rotorique lors du démarrage, on peut obtenir que le couple moteur soit maximal à l'instant de démarrage ($g = 1$ sur la courbe C).

Le couple d'un moteur asynchrone est proportionnel au carré de la tension et, pour cette raison, même une faible diminution de la tension est accompagnée d'une forte diminution du couple.

La puissance P_1 appliquée à l'enroulement statorique d'un moteur asynchrone est:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

où m_1 est le nombre de phases.

Dans le stator du moteur on a les pertes d'énergie suivantes.

1. Dans l'enroulement statorique $P_{és} = m_1 I_1^2 r_1$.

2. Dans le fer du stator les pertes par hystérésis et courants de Foucault P_f.

La puissance fournie au rotor représente la puissance du champ magnétique tournant appelée également *puissance électromagnétique* $P_{ém}$.

La puissance électromagnétique est égale à la différence entre la puissance fournie au moteur et les pertes dans le stator du moteur, c'est-à-dire :

$$P_{\text{ém}}=P_1-(P_f+P_{\text{és}}).$$

La puissance $P_{\text{ém}}$ peut être exprimée également sous la forme :

$$P_{\text{ém}}=\omega_1 C,$$

où $\omega_1=\frac{2\pi n_1}{60}$ est la vitesse angulaire de rotation du flux statorique ;

C est le couple moteur développé par le flux magnétique et exprimé en joules.

La puissance mécanique développée par le rotor du moteur est :

$$P_2'=\omega_2 C,$$

où $\omega_2=\frac{2\pi n_2}{60}$ est la vitesse angulaire du rotor.

La différence entre $P_{\text{ém}}$ et P_2' représente les pertes électriques dans l'enroulement rotorique $P_{\text{ér}}$ si l'on néglige les pertes dans le fer du rotor vu leur petitesse (la fréquence de l'inversion d'aimantation du rotor est généralement très petite) :

$$P_{\text{ér}}=P_{\text{ém}}-P_2'=m_2 r_2 I_2^2.$$

Le glissement du moteur est :

$$g=\frac{\omega_1-\omega_2}{\omega_1},$$

d'où

$$g_1\omega=\omega_1-\omega_2.$$

La puissance $P_{\text{ér}}$ peut être exprimée aussi de façon suivante :

$$P_{\text{ér}}=P_{\text{ém}}-P_2'=C\omega_1-C\omega_2=C(\omega_1-\omega_2)=C\omega_1 g=gP_{\text{ém}}.$$

Par conséquent, les pertes dans l'enroulement rotorique sont proportionnelles au glissement.

Si on retranche de la puissance mécanique P_2' développée par le rotor les pertes mécaniques $P_{\text{méc}}$ dues au frottement dans les paliers du rotor, au frottement contre l'air, etc., les pertes supplémentaires P_s qui apparaissent en charge et sont dues aux champs de fuites du rotor ainsi que les pertes provoquées par les pulsations du champ magnétique dans les dents du stator et du rotor, il nous reste la puissance utile sur l'arbre du moteur que nous désignerons par P_2.

Le rendement d'un moteur asynchrone peut être calculé par la formule :

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}=\frac{P_1-(P_{\text{méc}}+P_f+P_{\text{és}}+P_s+P_{\text{ér}})}{P_1}.$$

Nous avons trouvé précédemment l'expression du couple d'un moteur asynchrone. Nous allons maintenant trouver la même expression par une autre méthode.

La puissance électromagnétique $P_{ém}$ peut être exprimée par la formule suivante:

$$P_{ém} = m_1 E_2' I_2' \cos \psi_2 = m_2 E_{2g} I_2 \cos \psi_2,$$

où E_2' est la F.É.M. du rotor réduite au stator et égale à:

$$E_2' = E_2 \frac{w_1 k_1}{w_2 k_2},$$

où w_1 est le nombre de spires de l'enroulement d'une phase du stator;
w_2 est le nombre de spires de l'enroulement d'une phase du rotor;
k_1 est le coefficient de bobinage de l'enroulement statorique;
k_2 est le coefficient de bobinage de l'enroulement rotorique;
I_2' est le courant rotorique réduit au stator et égal à $I_2' = I_2 \frac{m_2 w_2 k_2}{m_1 w_1 k_1}$;
ψ_2 est l'angle de déphasage entre le courant rotorique et sa F.É.M.

Nous avons trouvé plus haut l'expression pour la F.É.M. du rotor:

$$E_{2g} = 4{,}44 k_2 g f_1 w_2 \Phi_m.$$

En introduisant la valeur de E_{2g} pour $g = 1$ dans la formule de $P_{ém}$, on obtient:

$$P_{ém} = 4{,}44 m_2 k_2 f_1 w_2 I_2 \Phi_m \cos \psi_2 = \omega_1 C,$$

d'où

$$C = \frac{4{,}44 m_2 k_2 f_1 w_2}{\omega_1} \Phi_m I_2 \cos \psi_2.$$

En désignant une partie de cette expression par un nombre constant:

$$c_3 = \frac{4{,}44 m_2 k_2 f_1 w_2}{\omega_1},$$

on obtient:

$$C = c_3 \Phi_m I_2 \cos \psi_2.$$

Cette dernière expression montre que le couple d'un moteur asynchrone est proportionnel au produit du flux magnétique tournant par le courant rotorique et par le cosinus de l'angle formé par la F.É.M. du rotor et son courant.

De la formule $P_{ér} = C\omega_1 g$, on a:

$$C = \frac{P_{ér}}{\omega_1 g} = \frac{m_2 I_2^2 r_2}{\omega_1 g} = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{\omega_1 g}.$$

Cette dernière expression montre que le couple moteur est proportionnel aux pertes par effet Joule ($I_2^2 r_2$) dans l'enroulement rotorique.

Le schéma équivalent d'un moteur asynchrone nous permet de déterminer la valeur du courant rotorique réduit que nous indiquons ici sans démonstration:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{g}\right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}},$$

où r_1 est la résistance ohmique de l'enroulement statorique;
x_1 est la réactance d'induction de l'enroulement statorique;
r_2' est la résistance ohmique de l'enroulement rotorique réduite au stator;
x_2' est la réactance d'induction de l'enroulement rotorique réduite au stator;
c_1 est un coefficient compris entre 1,02 et 1,05.

En introduisant dans la dernière formule du couple moteur l'expression du courant rotorique réduit, on obtient:

$$C = \frac{m_1 U_1^2 r_2'}{g\omega_1 \left[\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{g} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]} .$$

L'équation du couple montre que le couple du moteur est proportionnel au carré de la tension U_1^2.

§ 120. MOTEUR ASYNCHRONE À ROTOR EN COURT-CIRCUIT

Le moteur asynchrone à rotor en court-circuit (fig. 225 et 226) est le plus répandu parmi les moteurs électriques employés dans l'industrie. L'organisation d'un moteur asynchrone est la suivante. Sur le stator *1* (fig. 226) est placé un enroulement triphasé *2* alimenté en courant triphasé. Les entrées des trois phases de cet enroulement aboutissent à une plaque à bornes commune fixée à l'extérieur sur la carcasse *3* du moteur.

Puisque les enroulements statoriques sont parcourus par un courant alternatif, le fer du stator est traversé par un flux magnétique alternatif. Pour diminuer les courants de Foucault qui apparaissent dans le stator, ce dernier est fait en tôles d'acier allié de 0,35 ou de 0,5 mm d'épaisseur. Les tôles sont isolées l'une de l'autre par du vernis. Les tôles ayant des encoches pour l'enroulement sont serrées à l'aide de boulons qui sont isolés du stator. Le noyau assemblé du stator est fixé dans la carcasse en fonte *3* du moteur.

Le rotor *4* est également en tôles d'acier. Dans les encoches du rotor on place des tiges de cuivre qui sont soudées des deux côtés aux couronnes de cuivre *5*.

Un tel rotor rappelle par son aspect extérieur une cage d'écureuil (fig. 227, *a*).

Actuellement, dans tous les moteurs de puissance jusqu'à 100 kW on fait la « cage d'écureuil » en aluminium coulé sous pression dans les encoches du rotor (fig. 227, *b*).

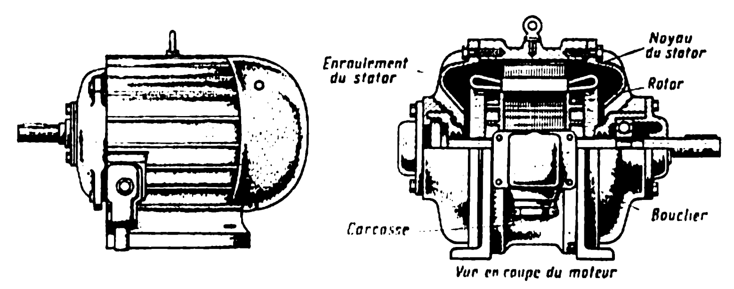


Fig. 225. Vue d'ensemble et en coupe d'un moteur asynchrone à rotor en court-circuit

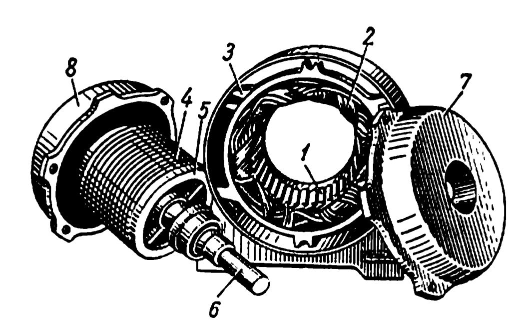


Fig. 226. Moteur asynchrone à rotor en court-circuit démonté

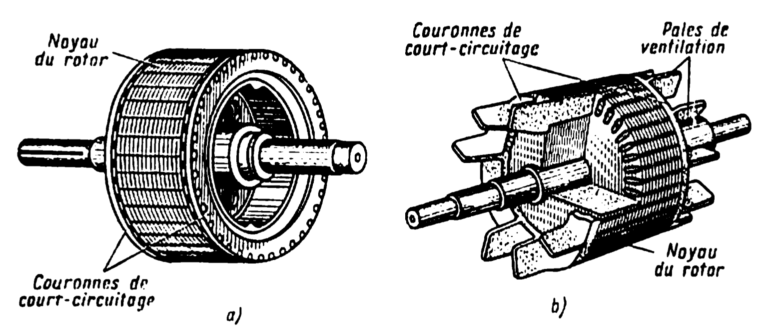


Fig. 227. Vue extérieure et coupe partielle d'un rotor en court-circuit : a — rotor à enroulement en « cage d'écureuil »; b — rotor en court-circuit rempli d'aluminium

L'arbre *6* du rotor (fig. 226) tourne dans des roulements fixés dans les boucliers *7* et *8*. Les boucliers sont boulonnés à la carcasse du moteur. Sur un bout de l'arbre est calée une poulie pour transmettre la rotation à la machine commandée. Le démarrage d'un moteur à rotor en court-circuit est très simple. Il faut pour cela, à l'aide d'un interrupteur à couteaux (ou un autre dispositif de démarrage), mettre l'enroulement statorique sous tension et le rotor commencera à tourner. Au démarrage, le moteur à rotor en court-circuit prend au réseau un courant de démarrage qui est 5 à 7 fois plus grand que le courant nominal absorbé lors du fonctionnement normal.

Les grands courants de démarrage des moteurs provoquent une forte chute de tension dans le réseau qui influe de façon négative sur le fonctionnement des autres récepteurs.

Au démarrage, lorsque la fréquence du courant rotorique est égale à celle du courant statorique, la réactance d'induction de l'enroulement rotorique est grande, l'angle de déphasage ψ_2 entre la F.É.M. E_{2g} et le courant rotorique I_2 est également grand. Par conséquent, le couple de démarrage du moteur est faible. Nous avons indiqué plus haut qu'en augmentant la résistance ohmique du circuit de l'enroulement rotorique on peut augmenter le couple du moteur. On pourrait faire l'enroulement rotorique à plus grande résistance, mais cela provoquerait un fort échauffement de l'enroulement et une diminution du rendement du moteur. Pour améliorer les caractéristiques de démarrage des moteurs asynchrones à rotor en court-circuit on utilise des moteurs à deux enroulements court-circuités dans le rotor et des moteurs à encoches profondes.

Le rotor d'un moteur à deux cages (fig. 228) comporte une cage de démarrage extérieure ayant une grande résistance ohmique et une faible réactance d'induction et une cage de travail intérieure possédant une faible résistance ohmique et une grande réactance.

Les tiges de la cage de démarrage sont généralement faites en laiton au manganèse. La cage de travail est en cuivre rouge. La section de la cage de travail est plus grande que celle de la cage de démarrage. Par un choix convenable des matériaux et de la section des tiges, la résistance de la cage de démarrage est 4 à 5 fois celle de la cage de travail.

On voit sur la figure 228, *b* qu'entre les tiges de l'enroulement de démarrage et celles de l'enroulement de tra-

vail il existe une fente étroite dont les dimensions déterminent l'inductance de la cage de travail intérieure.

Examinons le fonctionnement d'un moteur à deux cages.

A l'instant du démarrage, lorsque la fréquence des courants rotoriques est égale à celle du réseau, le flux magnétique

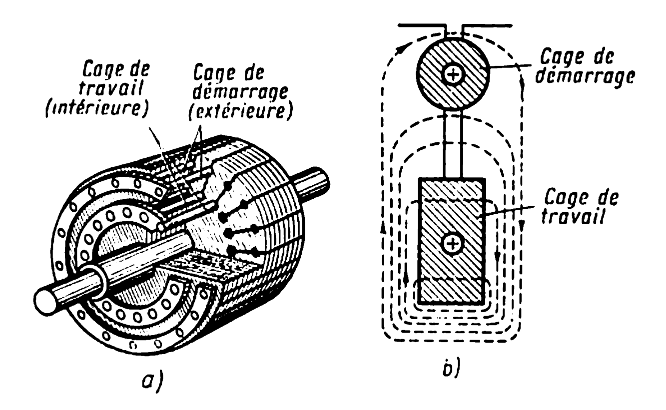


Fig. 228. Rotor à double cage:
a — vue d'ensemble du rotor découpé partiellement; b — coupe d'une encoche

de fuites de la cage de travail est grand et l'inductance de la cage est également grande. Il en résulte que le déphasage entre le courant de la cage de travail et la F.É.M. induite dans cette dernière est grand et le couple moteur créé par la cage est petit. Grâce à la grande résistance ohmique et la faible inductance de la cage de démarrage, le courant et les F.É.M. induites dans celle-ci sont légèrement déphasés et le couple moteur développé par la cage de démarrage est grand. Il en résulte que lors du démarrage le couple moteur est assuré surtout par la cage de démarrage.

Avec l'accroissement de la vitesse du moteur, la fréquence des courants rotoriques diminue, l'inductance des cages influe moins sur le fonctionnement du moteur et la répartition des courants dans les cages est déterminée seulement par leurs résistances ohmiques. Mais, comme il a été déjà indiqué, la résistance de la cage de travail est plusieurs fois plus petite que celle de la cage de démarrage. Pour cette raison, lors du travail normal du moteur la plus grande partie du courant passe par la cage de travail et le couple moteur est obtenu surtout grâce à cette cage.

La figure 229 représente la variation du couple d'un moteur à deux cages en fonction du glissement. La courbe *1* indique la variation du couple créé par l'enroulement de démarrage et la courbe *2*, la variation du couple créé par l'enroulement de travail. La somme des valeurs instantanées des couples créés par les deux enroulements donne la courbe *C* du couple d'un moteur à deux cages.

Le rotor dont les deux cages sont remplies d'aluminium coulé est de construction plus simple. La fig. 230 montre

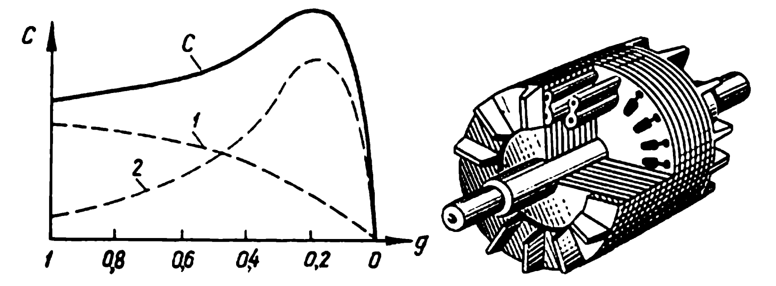


Fig. 229. Courbes des couples d'un moteur à double cage

Fig. 230. Rotor à double cage d'aluminium

l'aspect extérieur et la coupe partielle d'un rotor à double cage remplie d'aluminium.

Un moteur à deux cages est de 20 à 30 % plus cher qu'un moteur asynchrone à rotor en court-circuit de construction ordinaire. L'industrie soviétique produit des moteurs à double cage à puissance comprise entre 5 et 2000 kW.

On utilise également des moteurs à encoches profondes (fig. 231). Le rapport de la longueur de l'encoche à sa largeur est compris entre 10 et 12.

Pendant le démarrage, la partie intérieure de l'encoche est traversée par un plus grand nombre de lignes d'induction du flux de fuites que sa partie extérieure. Il en résulte que la réactance de la partie intérieure est plus grande que celle de la partie extérieure. Cela produit le déplacement du courant rotorique vers la partie extérieure des tiges de l'enroulement. La densité du courant dans les couches extérieures de la tige augmente, ce qui équivaut à la diminution de la section des tiges et à l'accroissement de la résistance ohmique de l'enroulement. Ceci provoque un accroissement du couple moteur. De plus, l'accroissement

de la réactance d'induction de l'enroulement rotorique fait diminuer le courant de démarrage. Avec l'accroissement de la vitesse, le moteur acquiert des propriétés correspondant à sa construction normale.

Le tableau 17 indique les caractéristiques de démarrage d'un moteur à rotor en court-circuit de construction normale,

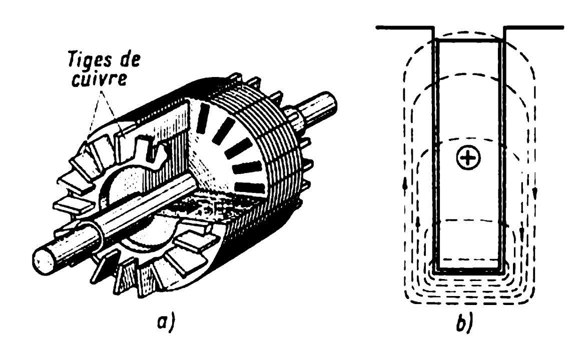


Fig. 231. Rotor à encoches profondes:
a — vue d'ensemble avec coupe partielle; *b* — coupe d'une encoche

d'un moteur à double cage et d'un moteur à encoches profondes. Les propriétés de démarrage sont données sous forme de rapport du courant de démarrage I_d au courant nominal I_n et sous forme de rapport du couple de démarrage C_d au couple nominal C_n.

Tableau 17

Caractéristiques de démarrage des moteurs à rotor en court-circuit

Moteur de construction normale		Moteur à double cage		Moteur à encoches profondes	
$\frac{I_d}{I_n}$	$\frac{C_d}{C_n}$	$\frac{I_d}{I_n}$	$\frac{C_d}{C_n}$	$\frac{I_d}{I_n}$	$\frac{C_d}{C_n}$
4 à 7	0,8 à 1,2	3,3 à 5,5	1 à 2	4 à 4,8	1,2 à 1,5

§ 121. MOTEUR ASYNCHRONE À ROTOR BOBINÉ

En examinant les défauts des moteurs asynchrones à rotor en court-circuit il faut noter la difficulté de réglage de la vitesse de ces moteurs et leur grand courant de démar-

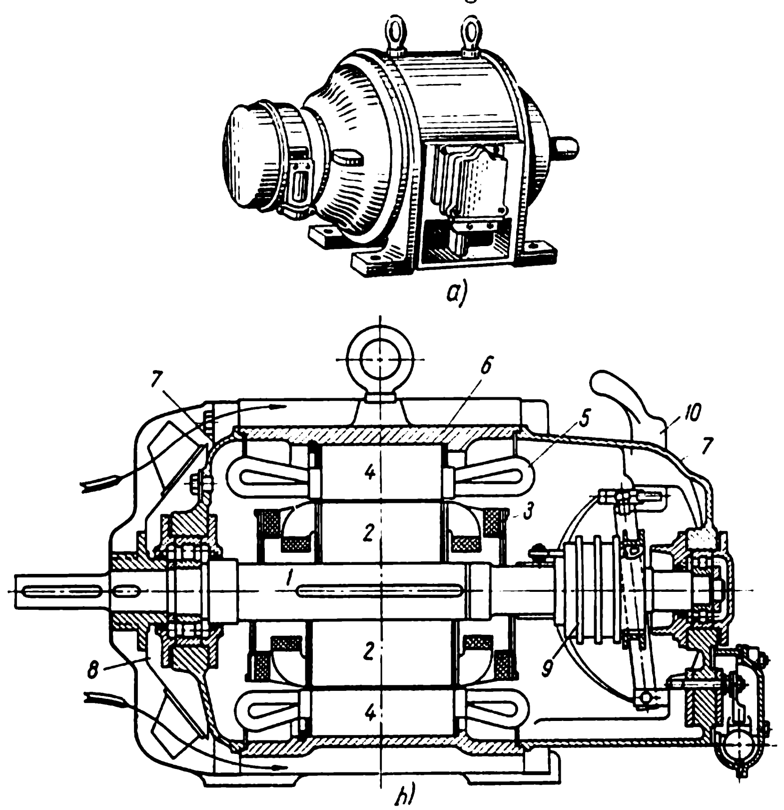
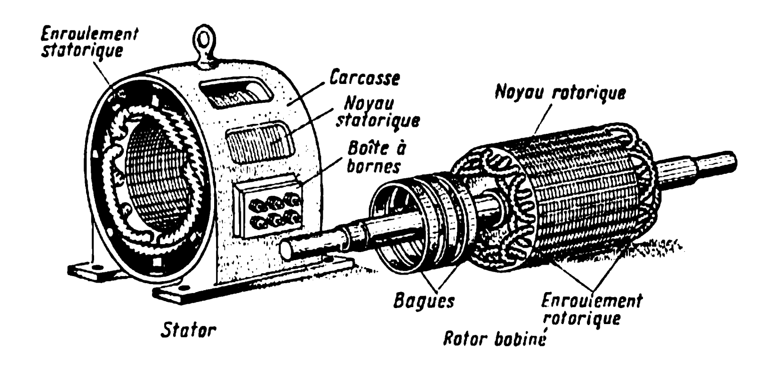


Fig. 232. Moteur asynchrone à rotor bobiné:

a — vue extérieure; *b* — coupe longitudinale du moteur; la partie supérieure correspond à un moteur prévu pour $n = 1500$ tr/mn; la partie inférieure, pour $n_1 = 1000$ tr/mn: *1* — arbre, *2* — fer du rotor, *3* — enroulement rotorique, *4* — fer du stator, *5* — enroulement statorique, *6* — carcasse du stator, *7* — boucliers, *8* — ventilateur, *9* — bagues, *10* — manette de relevage des balais

rage. Ce sont les raisons principales pour lesquelles on utilise aussi les moteurs asynchrones à rotor bobiné.

La figure 232 montre l'aspect extérieur et la coupe d'un moteur asynchrone à rotor bobiné et sur la figure 233 on voit ce moteur démonté.



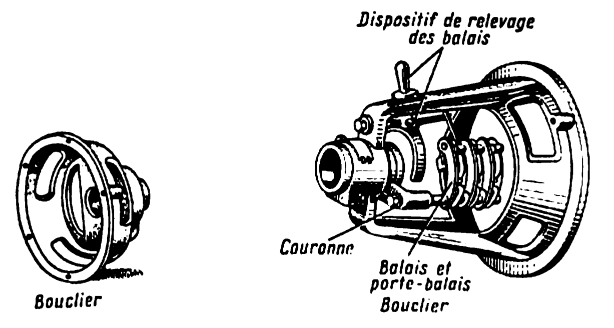


Fig. 233. Moteur asynchrone à rotor bobiné démonté

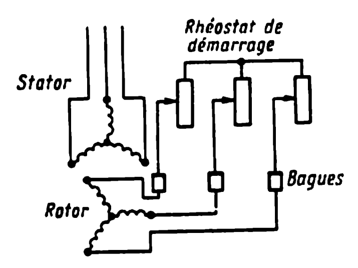


Fig. 234. Schéma de branchement d'un moteur asynchrone à rotor bobiné avec rhéostat de démarrage

Le stator d'un tel moteur et l'enroulement statorique ne diffèrent pas du stator d'un moteur à rotor en court-circuit. La différence entre ces moteurs réside dans la construction du rotor. Le moteur à rotor bobiné a un rotor dans lequel, comme sur le stator, sont placés trois enroulements de phase couplés en étoile (plus rarement en triangle). Les extrémités libres des enroulements rotoriques aboutissent à trois bagues de cuivre fixées sur l'arbre du rotor et isolées l'une de l'autre ainsi que du noyau de fer rotorique et, pour cette raison, ce moteur est également appelé moteur à bagues.

Nous avons indiqué plus haut que l'introduction d'une résistance ohmique dans le circuit rotorique pendant le démarrage fait diminuer le courant de démarrage et augmente le couple de démarrage. A cette fin, les moteurs à rotor bobiné sont dotés d'un rhéostat de démarrage (fig. 234) relié à l'enroulement rotorique à l'aide de balais appliqués contre les bagues. Au démarrage du moteur la résistance du rhéostat est maximale (cette position est indiquée sur la figure 234). Au fur et à mesure que la vitesse du rotor augmente, on fait diminuer la résistance du rhéostat et lorsque le moteur atteint sa vitesse normale on court-circuite le rhéostat.

Certains moteurs à rotor bobiné sont dotés d'un dispositif permettant de court-circuiter les bagues et de relever les balais.

§ 122. PROPRIÉTÉS DES MOTEURS ASYNCHRONES ET DOMAINES DE LEUR EMPLOI

Les moteurs à rotor en court-circuit présentent les avantages suivants:

1) vitesse à peu près constante à différentes charges;
2) grande capacité de surcharge;
3) construction simple;
4) facilité de démarrage et possibilité de le rendre automatique;
5) cos φ et rendement plus élevés que ceux d'un moteur à rotor bobiné.

Leurs défauts sont: 1) réglage difficile de la vitesse de rotation; 2) fort courant de démarrage; 3) faible cos φ du moteur sous-chargé; 4) sensibilité aux variations de la tension.

Les moteurs asynchrones à rotor en court-circuit sont utilisés lorsqu'on n'a pas besoin de régler la vitesse de rotation du moteur et lorsque la puissance exigée n'est pas très grande.

Les moteurs à rotor bobiné présentent les avantages suivants: 1) grand couple initial; 2) grande capacité de surcharge; 3) vitesse à peu près constante à différentes charges; 4) courant de démarrage plus faible en comparaison avec un moteur à rotor en court-circuit; 5) possibilité d'utiliser des dispositifs de démarrage automatiques.

Les défauts de ces moteurs sont: 1) grande sensibilité aux variations de la tension; 2) cos φ et rendement plus petits que ceux d'un moteur à rotor en court-circuit; 3) faible cos φ du moteur sous-chargé.

Les moteurs à rotor bobiné sont utilisés lorsqu'on n'a pas besoin d'une grande variation progressive de la vitesse et lorsque les moteurs sont de grande puissance.

La capacité de surcharge des moteurs est caractérisée par le rapport du couple maximal C_{max} au couple nominal C_n. Selon la puissance et la destination du moteur, le rapport $\frac{C_{max}}{C_n}$ varie entre 1 et 3,4.

§ 123. ENROULEMENTS STATORIQUES ET ROTORIQUES DES MOTEURS ASYNCHRONES

Pour obtenir un champ magnétique tournant on place sur le stator du moteur un enroulement triphasé. L'enroulement est placé dans les encoches et comprend plusieurs bobines reliées entre elles. Chaque bobine comporte une ou plusieurs spires isolées l'une de l'autre ainsi que des parois de l'encoche. L'isolement des enroulements dépend de la valeur de la tension, de la température pour laquelle est prévu l'enroulement, de la forme et des dimensions de l'encoche ainsi que du type d'enroulement. Si dans l'encoche on place un côté de la bobine, un tel enroulement est appelé *à une couche*. Lorsque l'encoche comporte deux côtés d'une bobine l'enroulement est dit *à deux couches*. Une bobine peut être à plusieurs sections comportant chacune une ou plusieurs spires. La figure 235 montre une bobine à deux sections dont chacune comprend trois spires. Si on désigne par z le nombre total d'encoches du stator, par $2p$ le nombre de pôles, alors le nombre d'encoches par pas polaire sera:

$$Q = \frac{z}{2p}.$$

On appelle pas polaire τ la distance suivant la circonférence du stator ou du rotor entre les axes de deux pôles voisins. Toutes les encoches des trois phases doivent se trouver à la distance d'un pas polaire l'une de l'autre. Le nombre d'encoches par pôle et par phase d'un enroulement triphasé sera donc:

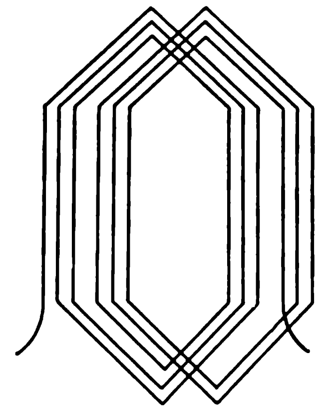


Fig. 235. Bobine d'enroulement en deux sections

$$q = \frac{Q}{3} = \frac{z}{3 \cdot 2p} .$$

Le *pas d'enroulement* y est la distance entre l'entrée et la sortie de la bobine (ou une section de l'enroulement). Le pas d'enroulement est exprimé en fractions du pas polaire τ ou en nombre d'encoches. Dans les enroulements à deux couches, la largeur de la section est généralement inférieure à τ (pas raccourci), ce qui permet de mieux utiliser le cuivre de l'enroulement.

La figure 236, *a* schématise l'enroulement statorique d'un moteur asynchrone. Chaque bobine de cet enroulement comprend deux conducteurs. Mais si on enroule un grand nombre de spires, les conducteurs fermeront le stator à l'intérieur et le rotor ne pourra pas être mis en place. En pliant les conducteurs latéralement, on obtient l'enroulement indiqué sur la figure 236, *b*. L'enroulement comprenant trois bobines crée un champ magnétique à deux pôles. Durant une période du courant triphasé le champ magnétique fera un tour. Pour la fréquence de 50 Hz cela correspondra à 50 tr/s ou à 3000 tr/mn.

Sur la figure 236, *c* et *d* est indiqué un enroulement dont chaque côté de la bobine comprend deux conducteurs.

La vitesse de rotation du champ magnétique d'un stator tétrapolaire est deux fois inférieure à celle du champ bipolaire et est égale à 1500 tr/mn (pour la fréquence de 50 Hz). L'enroulement d'un stator tétrapolaire à un conducteur par pôle et par phase est indiqué sur la figure 236, *e* et un enroulement à deux conducteurs par pôle et par phase est montré sur la figure 236, *f*.

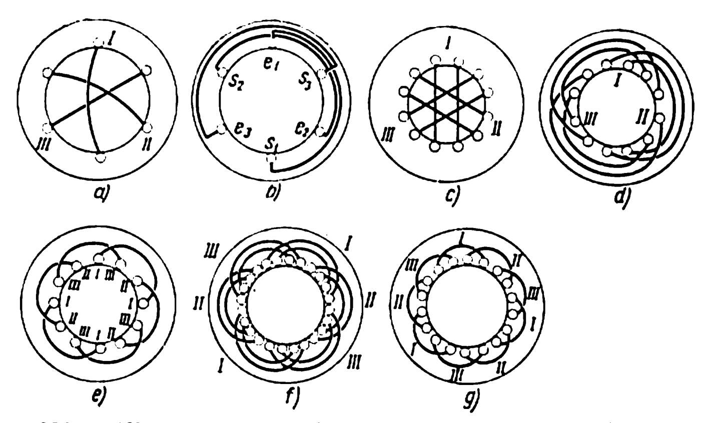


Fig. 236. Différents genres d'enroulement statorique d'un moteur asynchrone

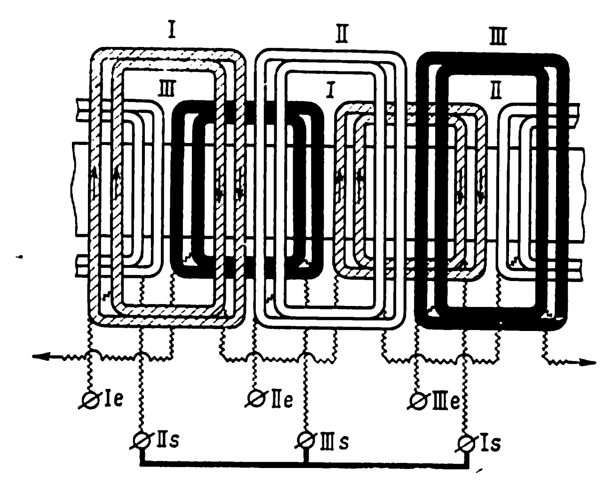


Fig. 237. Schéma développé d'un enroulement triphasé à une seule couche

Le champ magnétique d'un stator hexapolaire a une vitesse de rotation trois fois inférieure à celle d'un champ de stator bipolaire, c'est-à-dire 1000 tr/mn (pour la fréquence de 50 Hz). L'enroulement d'un stator hexapolaire à un conducteur par pôle et par phase est indiqué sur la figure 236, *g*.

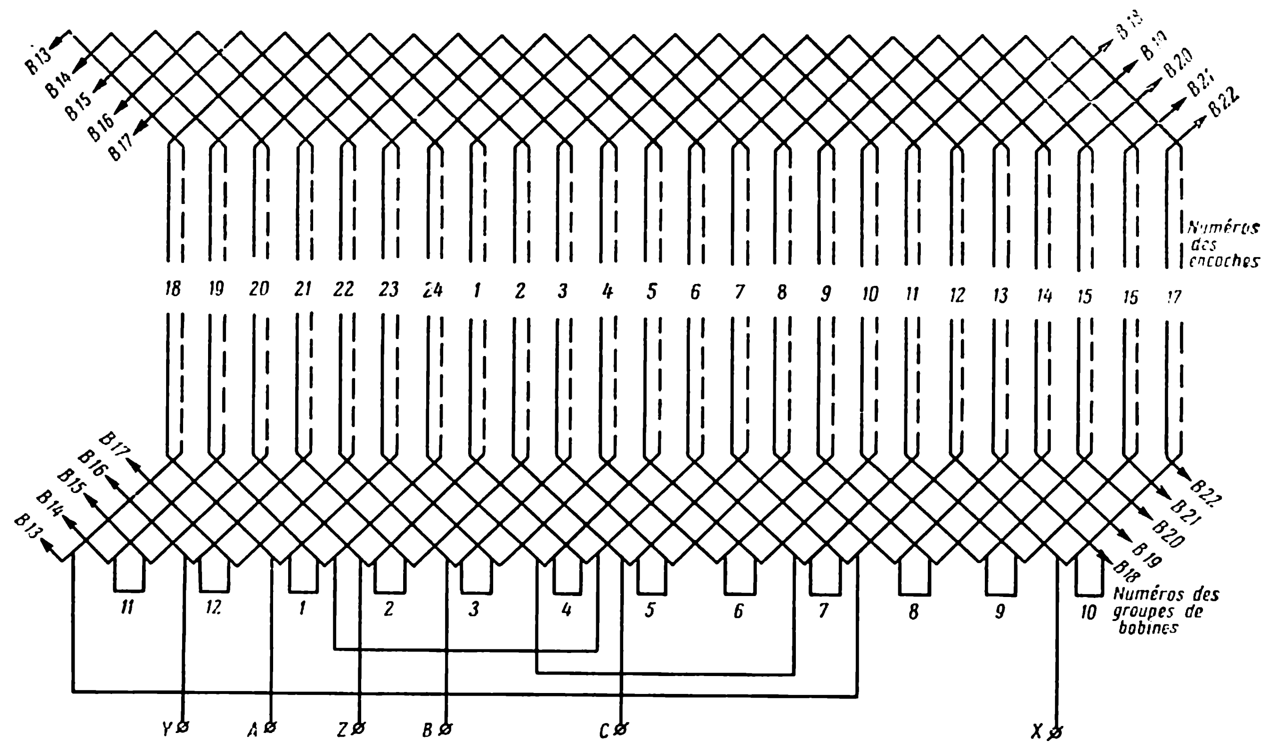


Fig. 238. Schéma développé d'un enroulement triphasé à deux couches, à pas raccourci

Le nombre de toutes les encoches statoriques est égal au triple produit du nombre de pôles du stator par le nombre d'encoches par pôle et par phase.

Le schéma développé d'un enroulement triphasé à une couche est indiqué sur la figure 237 et celui d'un enroulement imbriqué à deux couches à pas raccourci est indiqué sur la figure 238.

Les six extrémités de l'enroulement statorique aboutissent à la plaque à bornes du moteur.

§ 124. MOTEURS ASYNCHRONES MONOPHASÉS

A la différence des moteurs triphasés, ces moteurs ont un enroulement statorique monophasé (fig. 239, *a*, *b* et *c*, enroulement *A*). Le rotor d'un moteur monophasé a un enroulement triphasé bobiné à bagues ou un enroulement

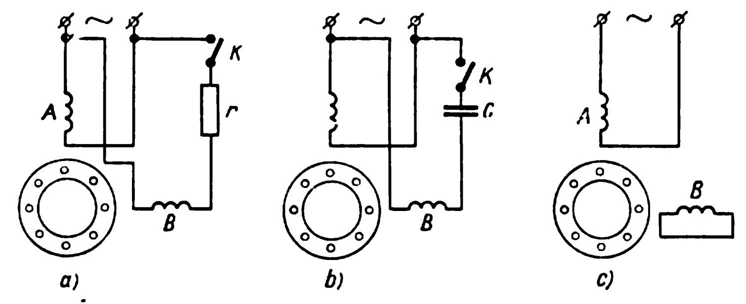


Fig. 239. Schéma de démarrage des moteurs asynchrones monophasés: *a* — en série avec l'enroulement de démarrage est connectée une résistance ohmique; *b* — en série avec l'enroulement de démarrage est connecté un condensateur; *c* — enroulement de démarrage formé par des spires court-circuitées placées dans les encoches du stator

en court-circuit. Nous avons indiqué précédemment qu'un courant monophasé ne crée pas de champ magnétique tournant. Pour cette raison les moteurs monophasés n'ont pas de couple de démarrage. Pour créer ce couple on dispose sur le stator un second enroulement, appelé enroulement de démarrage, décalé de 90° par rapport à l'enroulement de travail (fig. 239, *a* et *b*, enroulement *B*). Les deux enroulements sont alimentés par le secteur monophasé. Pour créer entre les courants des deux enroulements un déphasage voisin de 90° on branche en série avec les enroulements de démarrage une résistance ohmique ou une capacité (fig. 239, *a*

et *b*). L'enroulement de démarrage est branché seulement pour la durée de démarrage et lorsque le moteur tourne à sa vitesse normale, on le débranche du réseau à l'aide d'un interrupteur *K*. Le moteur continue alors à marcher avec le seul enroulement de travail.

Dans les moteurs monophasés de faible puissance (0,5 à 30 W), l'enroulement de démarrage est formé par des spires court-circuitées (fig. 239, *c*). Dans ce cas, le stator est doté de pôles saillants dont une partie est embrassée par les spires court-circuitées. Les courants dans un tel enroulement sont induits par l'enroulement de travail.

Les moteurs asynchrones monophasés présentent par rapport aux moteurs triphasés les défauts suivants : 1) absence de couple de démarrage ; 2) faible capacité de surcharge ; 3) rendement plus bas ; 4) facteur de puissance (cos φ) plus petit.

Questions de contrôle

1. Quel est le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone?
2. Qu'entend-on par glissement d'un moteur et comment le détermine-t-on ?
3. Quelle analogie existe-t-il entre un moteur asynchrone et un transformateur ?
4. De quoi dépend le couple d'un moteur asynchrone ?
5. Comment est organisé un moteur asynchrone à rotor en court-circuit ?
6. Quelle est la constitution des moteurs à double cage et des moteurs à encoches profondes ?
7. Quelle est la constitution des moteurs asynchrones à rotor bobiné ?
8. Expliquer la raison pour laquelle lors du démarrage des moteurs asynchrones à rotor bobiné on introduit un rhéostat de démarrage dans le circuit rotorique.
9. Quelle est l'organisation d'un moteur asynchrone monophasé et comment est-il branché sur le réseau ?

CHAPITRE XI

MACHINES SYNCHRONES

On appelle machine synchrone une machine dont la vitesse est constante et qui, pour une fréquence donnée du courant alternatif, est déterminée par le nombre de paires de pôles p :

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} .$$

D'après le principe de réversibilité, découvert par Lenz, une machine synchrone peut fonctionner soit en alternateur, soit en moteur.

§ 125. ALTERNATEURS SYNCHRONES

Le principe de fonctionnement des alternateurs synchrones repose sur le phénomène d'induction électromagnétique. Etant donné qu'il est sans importance que ce soit le conducteur mobile qui coupe le champ magnétique fixe ou, au contraire, ce soit le champ mobile qui coupe le conducteur fixe, on peut construire des alternateurs synchrones de deux types. Dans les alternateurs du premier type on dispose les pôles sur le stator en les alimentant en courant continu et on place les conducteurs sur le rotor en prélevant le courant alternatif à l'aide de bagues et de balais.

Souvent, on appelle *inducteur* la partie de la machine qui crée le champ magnétique et *induit* la partie de la machine où est disposé l'*enroulement* dans lequel est induite la F.É.M.

Dans le premier type d'alternateur l'inducteur est donc fixe et l'induit mobile.

Les alternateurs modernes sont construits pour des tensions atteignant 18 kV. Il est impossible de prélever une tension aussi élevée de l'enroulement tournant de l'induit

à l'aide de contacts glissants (bagues et balais) car il est difficile d'isoler l'enroulement de haute tension. De plus, un induit tournant nécessite trois bagues tandis qu'un enroulement d'excitation tournant n'en demande que deux. Pour des grandes puissances de l'induit les dimensions de ses trois bagues seraient très grandes. Ceci explique le fait que dans les alternateurs modernes on place l'enroulement d'induit sur la partie fixe de la machine (sur le stator) et l'enroulement d'excitation (les pôles magnétiques) sur le rotor.

Le schéma d'un alternateur bipolaire de ce type a déjà été indiqué sur la figure 176. Pour actionner le rotor d'un alternateur on utilise un moteur primaire. On emploie comme moteur primaire: une turbine à vapeur (l'alternateur avec sa turbine est appelé groupe turbo-alternateur), une turbine hydraulique (groupe hydraulique), un moteur à combustion interne, le plus souvent un moteur Diesel (groupe Diesel-alternateur), un moteur électrique (moteur-alternateur), etc.

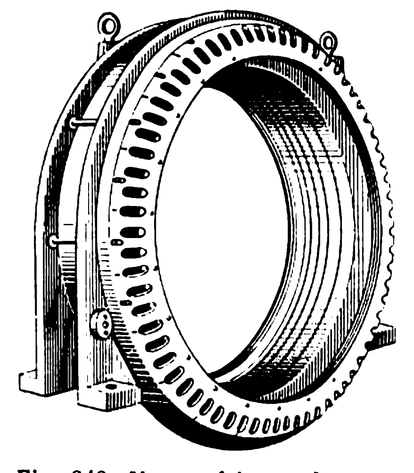


Fig. 240. Vue extérieure du stator d'un alternateur synchrone

§ 126. ORGANISATION DES ALTERNATEURS SYNCHRONES

1. Stator. Le stator d'un alternateur, comme celui des autres machines à courant alternatif, comprend un noyau en tôles d'acier magnétique dans les encoches duquel est logé l'enroulement à courant alternatif et une carcasse en fonte ou en tôles d'acier soudées.

Dans les encoches découpées sur la surface intérieure du noyau est placé l'enroulement statorique. L'enroulement est isolé de façon minutieuse, car la machine fonctionne généralement à haute tension. On utilise comme isolant la *micanite* et les *rubans de micanite*.

La figure 240 indique la vue extérieure du stator d'un alternateur.

2. Rotor. Les rotors des alternateurs se classent en deux types: a) rotors à pôles saillants et b) rotors à pôles lisses.

La figure 241 montre les schémas des alternateurs à rotor à pôles saillants et à pôles lisses.

On choisit une telle ou une autre construction du rotor en partant des conditions de résistance mécanique. Dans les alternateurs modernes actionnés par des moteurs rapides (turbines à vapeur), la vitesse circonférentielle du rotor peut atteindre 100 à 160 m/s (dans certains cas 170 m/s).

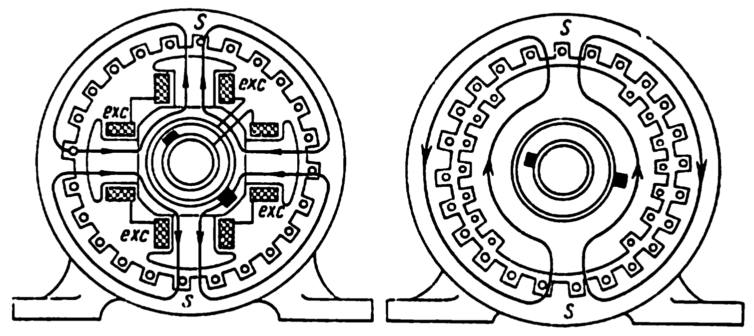


Fig. 241. Organisation schématique des alternateurs synchrones à rotor à pôles saillants et à pôles lisses

Pour cette raison les alternateurs à grande vitesse de rotation sont dotés d'un rotor à pôles lisses. La vitesse des alternateurs rapides est de 1500 tr/mn et de 3000 tr/mn.

Un rotor à pôles saillants est une pièce d'acier forgé. A la jante du rotor sont fixés les pôles sur lesquels on place les bobines de l'enroulement d'excitation connectées en série. Les extrémités de l'enroulement d'excitation sont reliées à deux bagues calées sur l'arbre du rotor. Contre ces bagues sont appliqués des balais auxquels est reliée une source de courant continu. Sur la figure 242 est montré un rotor à pôles saillants. Généralement, le courant continu nécessaire pour l'excitation du rotor est fourni par une génératrice à courant continu calée sur le même arbre que le rotor et appelée *excitatrice*. Sa puissance est de 0,25 à 1 % de la puissance nominale de l'alternateur. La tension nominale des excitatrices est comprise entre 60 et 350 V.

La figure 243 représente le schéma d'excitation d'une machine synchrone.

On construit également des alternateurs auto-excitateurs. Le courant continu nécessaire à l'excitation du rotor est fourni par les redresseurs au sélénium reliés à l'enroulement statorique de l'alternateur. Au premier instant, le faible champ de magnétisme rémanant du rotor en mouvement induit dans l'enroulement statorique une faible F.É.M.

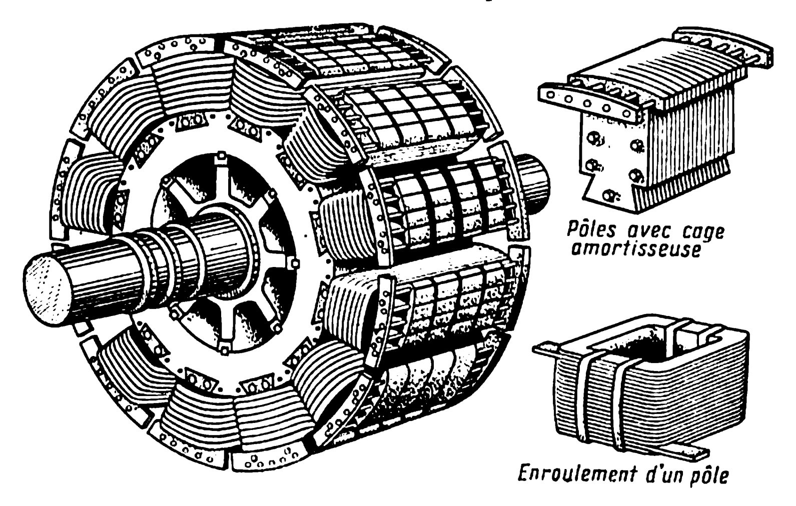


Fig. 242. Vue extérieure d'un rotor à pôles saillants

alternative. Les redresseurs au sélénium alimentés par la tension alternative fournissent un courant continu qui augmente le champ rotorique si bien que la tension de l'alternateur croît.

Un rotor à pôles lisses est construit à partir d'une pièce d'acier forgé qui est soumise à un traitement thermique et à l'usinage mécanique complexes. A titre d'exemple, indiquons les données du rotor d'un turbo-alternateur construit par l'usine « Electrosila ». Puissance : 100 000 kW à $n = 3000$ tr/mn. Diamètre du rotor $D = 0{,}99$ m, longueur $l = 6{,}35$ m. Vitesse circonférencielle du rotor : 155 m/s. Le rotor forgé et usiné pèse 46,5 t.

Sur la circonférence du rotor on fraise, dans le sens axial, des encoches où est logé l'enroulement d'excitation. Ce dernier est fixé dans les encoches à l'aide de coins en acier ou en bronze. Les parties frontales de l'enroulement sont frettées par des anneaux métalliques.

La figure 244 montre la vue d'ensemble d'un rotor à pôles lisses d'un turbo-alternateur.

Lors de la construction des machines électriques et des transformateurs on prête une grande attention à la ventilation. Les alternateurs sont refroidis à l'air ou à l'hydrogène.

Le refroidissement par l'air est réalisé à l'aide de ventilateurs calés sur l'arbre des deux côtés du rotor (pour les

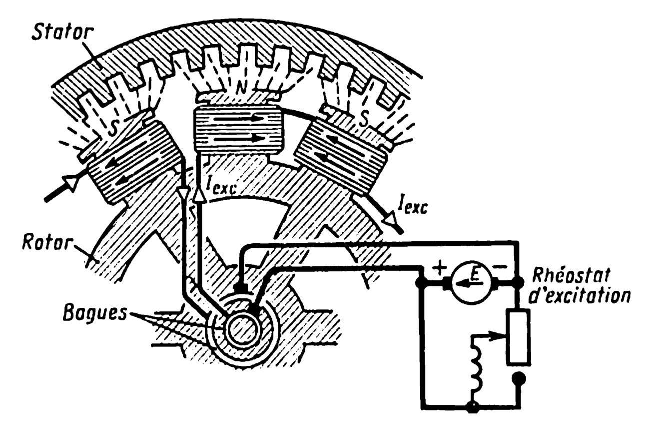


Fig. 243. Schéma d'excitation d'une machine synchrone

alternateurs à puissance de 1,5 à 50 000 kW) ou situés sous la machine dans une fosse de la fondation (pour les alternateurs de 100 000 kW).

Afin d'éviter l'encrassement de la machine par la poussière, on fait passer l'air froid destiné à la ventilation par des filtres. Lorsque la ventilation est en circuit fermé, la machine est refroidie par un volume d'air constant. Après avoir passé par la machine, l'air s'échauffe et arrive dans des réfrigérants pour être de nouveau refoulé dans la machine, etc. Un système de canaux de ventilation ménagés dans les différentes parties de la machine sert également à refroidir celle-ci. Le mode de refroidissement le plus efficace est le refroidissement par hydrogène. L'hydrogène dont la conductibilité thermique est 7,4 fois supérieure à celle de l'air évacue mieux la chaleur des parties réchauffées de la machine. Lorsqu'on utilise le refroidissement par l'air, les pertes par frottement contre l'air représentent

environ 50 % de toutes les pertes dans la machine. Le poids spécifique de l'hydrogène étant 14,5 fois plus faible que celui de l'air, le frottement contre l'hydrogène est donc beaucoup moindre. L'hydrogène contribue également à la conservation de l'isolation et du vernis avec lequel est couverte la machine. La vue extérieure d'un alternateur à pôles saillants avec son excitatrice est indiquée sur la figure 245 et la vue d'ensemble d'un alternateur à pôles lisses de 50 000 kW est montrée sur la figure 246.

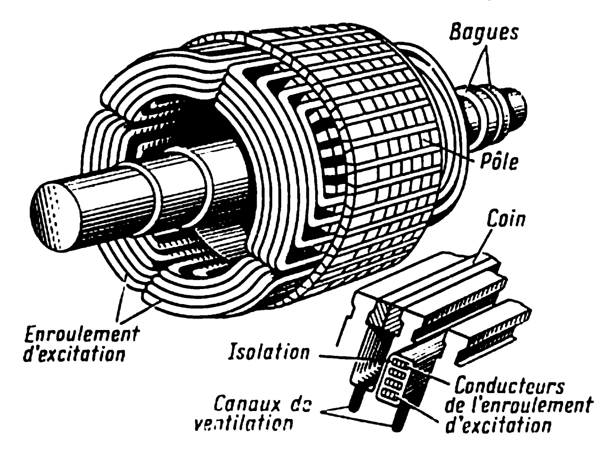


Fig. 244. Vue d'ensemble d'un rotor à pôles lisses

Les alternateurs hydrauliques sont actionnés par des turbines hydrauliques. Ces turbines sont le plus souvent à arbre vertical et tournent à faible vitesse. Un alternateur lent a un grand nombre de pôles et, pour cette raison, présente de grandes dimensions.

Ainsi un alternateur hydraulique du type CB $\frac{1200}{170}$ 96 de 50 000 kW fabriqué par l'usine « Electrosila » a un poids total de 1142 tonnes. Le diamètre de son stator est de 14 m, sa hauteur totale est de 8,9 m et le nombre de pôles est de 96.

La figure 247 représente le schéma d'un alternateur avec son excitatrice alimentant un moteur et des lampes d'éclairage. La figure 248 schématise les connexions entre l'alternateur et sa charge.

Les enroulements statoriques des alternateurs synchrones sont identiques à ceux des moteurs asynchrones.

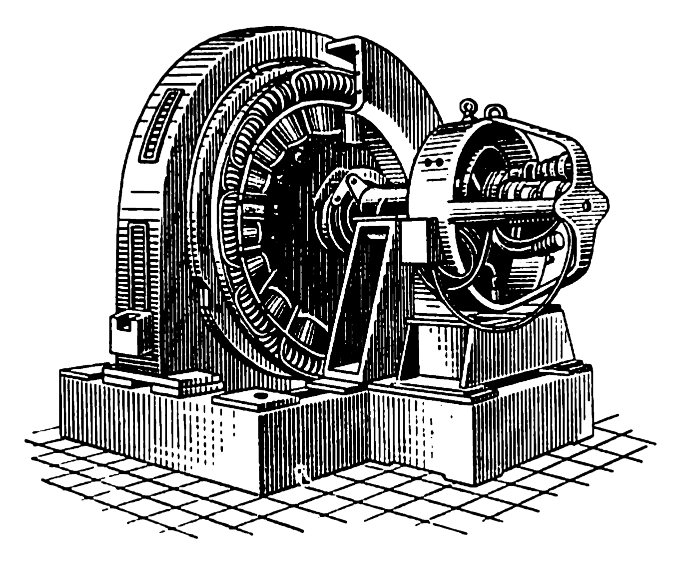


Fig. 245. Vue d'ensemble d'un alternateur synchrone avec son excitatrice

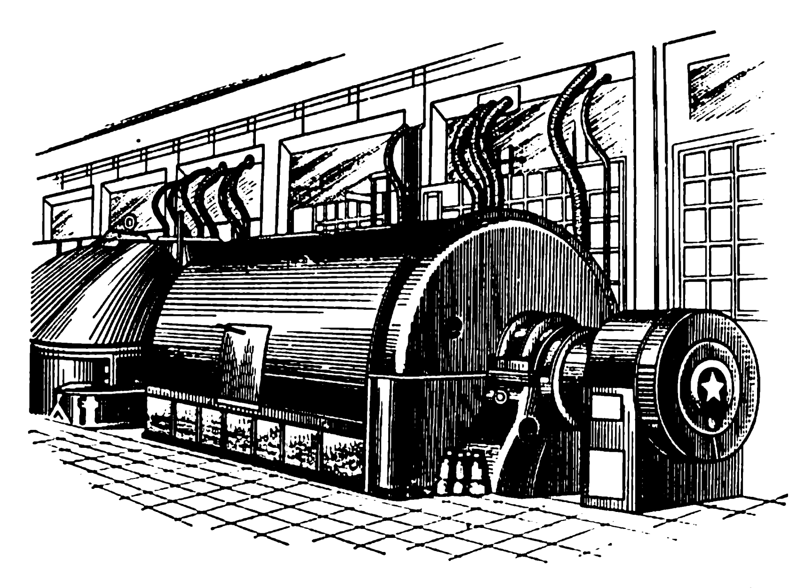


Fig. 246. Vue extérieure d'un alternateur synchrone de 50 000 kW

Les six extrémités des enroulements triphasés d'un alternateur aboutissent généralement à sa plaque à bornes. En reliant trois extrémités des enroulements en un point neutre commun et en sortant trois extrémités des enroulements dans le circuit extérieur, on obtient le couplage des

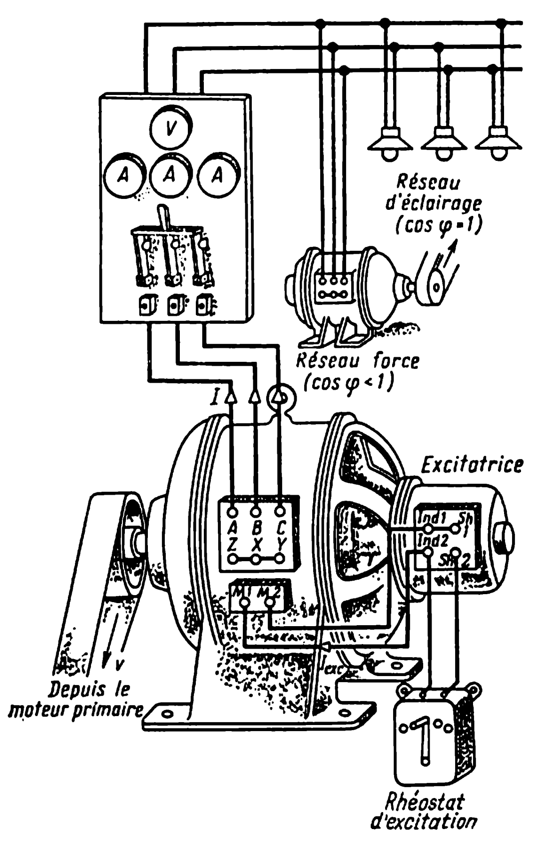


Fig. 247. Schéma d'un alternateur synchrone avec son excitatrice

enroulements en étoile (fig. 249, *a*). En réunissant la sortie du premier enroulement à l'entrée du deuxième, la sortie du deuxième enroulement à l'entrée du troisième, la sortie du troisième enroulement à l'entrée du premier et en faisant trois dérivations à partir des points de connexion, on obtient un couplage des enroulements en triangle (fig. 249, *b*).

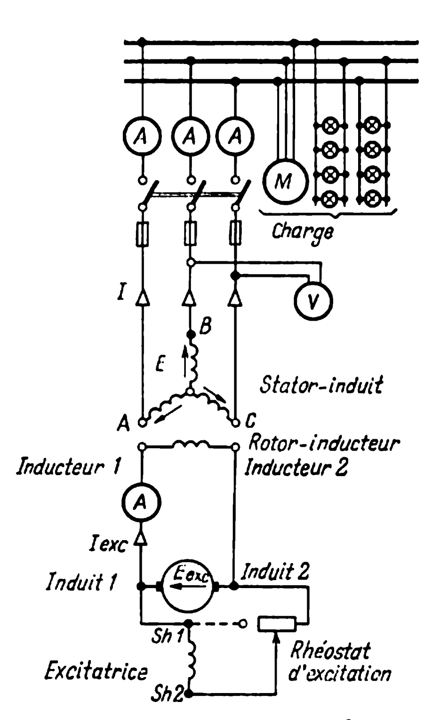


Fig. 248. **Schéma des connexions entre un alternateur synchrone et sa charge**

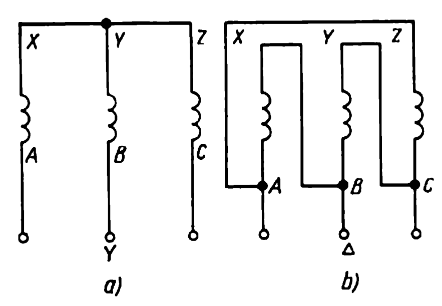


Fig. 249. Couplage en étoile et en triangle des enroulements de phase d'un alternateur triphasé

§ 127. RÉACTION D'INDUIT D'UN ALTERNATEUR SYNCHRONE

Lorsqu'un alternateur débite sur une charge, son enroulement statorique est parcouru par un courant qui crée un flux magnétique. Ce dernier se compose avec le flux rotorique pour former un flux résultant de la machine. Une telle action du flux magnétique du stator (de l'induit) sur le flux engendré par les pôles du rotor est appelée *réaction d'induit*. Par la suite, nous négligerons le flux de fuites du stator.

La réaction d'induit a une grande influence sur le fonctionnement d'un alternateur. Nous allons examiner trois cas caractéristiques.

1. L'alternateur débite dans une charge purement résistive. Le courant I est en phase avec la F.É.M. induite dans l'enroulement du stator.

Considérons l'instant où les deux côtés de la bobine d'un enroulement de phase se trouvent au-dessus des milieux des pôles (fig. 250, *a*). A cet instant, la F.É.M. de la bobine est maximale et puisque la charge de l'alternateur est purement ohmique, le courant dans la bobine est maximal. Le sens des lignes d'induction autour des conducteurs de la bobine du stator est déterminé d'après la « règle du tire-bouchon ». On voit sur la figure que le champ statorique désaimante la corne polaire d'entrée et aimante la corne de sortie. Ce cas est appelé réaction d'induit transversale.

2. L'alternateur débite dans une charge purement inductive et le courant est décalé en arrière de 90° sur la F.É.M. (fig. 250, *b*). Le maximum du courant a lieu à l'instant où les pôles après avoir passé les conducteurs correspondants se trouvent à une distance égale à la moitié du pas polaire. Le dessin montre que le flux magnétique du stator est opposé à celui des pôles le long de leur axe. Ce cas est appelé réaction d'induit démagnétisante longitudinale.

3. L'alternateur débite dans une charge purement capacitive. Le courant est alors en avance de 90° sur la F.É.M. (fig. 250, *c*).

Le maximum du courant a lieu à l'instant où les pôles n'ont pas encore atteint les conducteurs correspondants et se trouvent à une distance égale à la moitié du pas polaire. Le dessin montre que le flux magnétique du stator est dirigé dans le même sens que celui des pôles, le

long de leur axe. Ce cas est appelé réaction d'induit magnétisante longitudinale.

Sur la figure 250 on voit les instants où les courants dans le circuit d'enroulement d'une phase passent par leur maximum. A tout autre instant, les valeurs des courants dans l'enroulement de phase du stator seront plus faibles

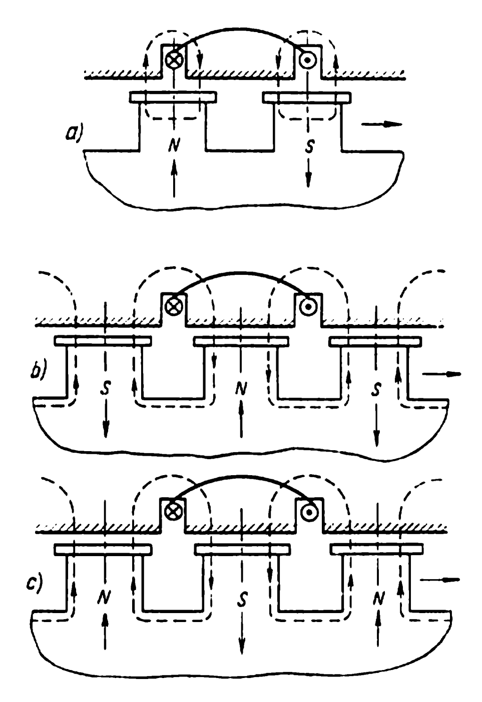


Fig. 250. Réaction d'induit d'un alternateur synchrone

et la réaction d'induit de l'enroulement d'une phase sera respectivement moindre. En réalité, la charge est mixte. Pour cette raison, le flux magnétique de réaction d'induit aura une composante transversale et une composante longitudinale.

De cette façon, la réaction d'induit d'un alternateur synchrone dépend de la nature de la charge, c'est-à-dire du déphasage entre la F.É.M. induite dans le stator et le courant de ce dernier.

§ 128. CARACTÉRISTIQUES DES ALTERNATEURS SYNCHRONES

Le fonctionnement d'une machine en différents régimes et ses propriétés sont déterminés par ses caractéristiques.

Pour prélever les caractéristiques d'un alternateur synchrone on réalise le schéma représenté par la figure 251.

Examinons la caractéristique de marche à vide d'un alternateur synchrone. Elle représente la variation de la F.É.M. E_0 induite dans le stator en fonction du courant d'excitation I_{exc}, le circuit extérieur de la machine étant ouvert:

Fig. 251. Schéma pour relever les caractéristiques d'un alternateur synchrone

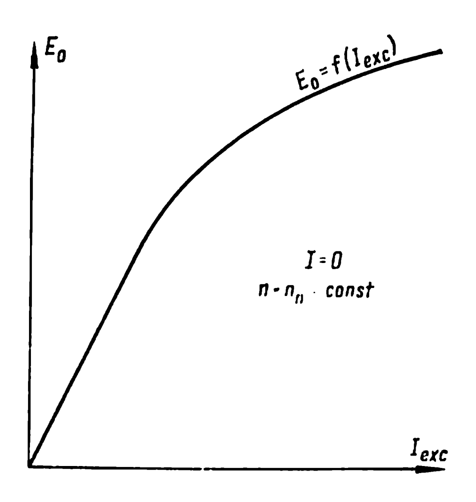


Fig. 252. Caractéristique à vide d'un alternateur synchrone

$$E_0 = f(I_{exc}) \text{ pour } n = n_n \text{ et } I = 0.$$

La machine tourne à la vitesse de synchronisme (n_n) correspondant à sa fréquence nominale. On augmente à l'aide d'un rhéostat le courant d'excitation, en notant les indications de l'ampèremètre inséré dans le circuit d'excitation. D'après les indications du voltmètre connecté aux bornes

de l'enroulement statorique, on détermine la valeur de la F.É.M. induite E_0.

La caractéristique du fonctionnement à vide d'un alternateur synchrone est indiquée sur la figure 252. La partie rectiligne de la caractéristique indique la proportionnalité existant entre la F.É.M. induite et le courant d'excitation. Ensuite, le circuit magnétique de la machine devient saturé, la courbe s'incline, c'est-à-dire pour un fort accroissement du courant d'excitation la F.É.M. induite croît très

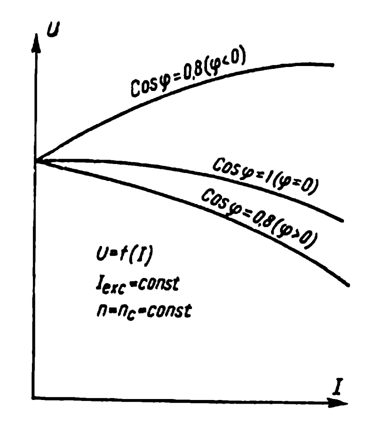


Fig. 253. Caractéristiques externes d'un alternateur synchrone

Fig. 254. Caractéristiques de réglage d'un alternateur synchrone

lentement. Généralement, le fonctionnement normal de la machine se passe au-delà du coude de la courbe à vide. La valeur de la tension U aux bornes de l'alternateur en fonction du courant de charge I pour des valeurs constantes du courant d'excitation I_{exc}, du facteur de puissance $\cos\varphi$ et de la vitesse de rotation n, est donnée par la caractéristique externe

$$U = f(I)$$

pour $I_{exc} = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$, $n = n_n = \text{const}$.

D'après les indications de l'ampèremètre et du voltmètre branchés dans le circuit de l'enroulement statorique, on construit la courbe caractéristique. Sur la figure 253 sont indiquées les caractéristiques externes d'un alternateur pour des charges de nature différente.

Rappelons au lecteur que dans un circuit on considère l'angle φ comme positif lorsque le courant est en retard sur la tension et comme négatif, lorsque le courant est en avance sur la tension.

La variation de la tension en fonction de la charge a lieu par suite de la réaction d'induit et la chute de tension dans l'enroulement d'induit (du stator).

Lorsque la charge est inductive, le courant réactif désaimante la machine et la tension diminue lors de l'accroissement du courant de charge.

Lorsque la charge est capacitive, la tension de l'alternateur augmente avec l'accroissement de la charge par suite de la réaction d'induit magnétisante longitudinale.

La caractéristique de réglage représente la variation du courant d'excitation I_{exc} en fonction du courant de charge I pour des valeurs constantes de la tension U aux bornes de l'alternateur, de la vitesse de rotation n et du facteur de puissance cos φ :

$$I_{exc} = f(I)$$

pour $U = U_n$; $n = n_n$ et $\cos \varphi = \text{const}$.

Les caractéristiques de réglage représentées sur la figure 254 montrent comment, lors de la variation de la charge, il faut faire varier le courant d'excitation pour compenser la chute de tension dans l'enroulement d'induit et l'effet de la réaction d'induit.

§ 129. COUPLAGE EN PARALLÈLE DES ALTERNATEURS SYNCHRONES

Pour coupler en parallèle un alternateur synchrone, il faut assurer les conditions suivantes.

1. La tension de la machine à coupler doit être égale à la tension du réseau ou d'une autre machine en marche.
2. La fréquence de l'alternateur à coupler doit être égale à celle du réseau.
3. Les tensions de toutes les phases de la machine à coupler doivent être en opposition de phase avec les tensions des phases correspondantes du réseau ou de la machine en marche.
4. Pour coupler en parallèle un alternateur triphasé, il faut assurer le même ordre de phases de la machine à coupler et du réseau.

La préparation au couplage en parallèle d'un alternateur synchrone se fait de façon suivante. On met en marche le moteur primaire et on règle sa vitesse de façon qu'elle soit à peu près égale à la vitesse nominale. Ensuite, on excite la machine et, en observant les indications du voltmètre connecté aux bornes du stator, on règle la tension de la machine à l'aide d'un rhéostat branché dans le circuit d'excitation jusqu'au moment où elle devient égale à la

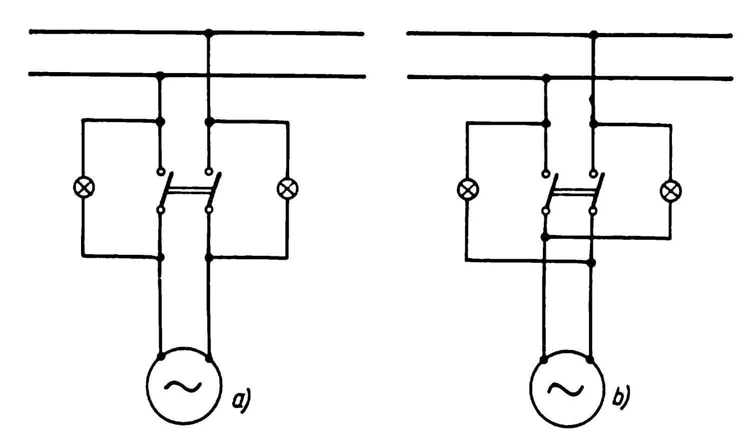


Fig. 255. Couplage des lampes de phase:
a — à l'extinction; b — à l'allumage

tension du réseau. En agissant sur le régulateur du moteur primaire et en observant les indications du fréquencemètre, on règle d'une façon plus précise la vitesse de la machine, de sorte que la fréquence de la machine à coupler soit égale à celle du réseau. Ainsi, la première et la deuxième condition indiquées plus haut seront assurées.

Pour assurer la troisième condition ainsi que pour établir une égalité totale des fréquences, on utilise des lampes de phase. Pour les machines à courant monophasé ces lampes peuvent être branchées suivant deux schémas: le couplage à l'extinction (fig. 255, *a*) et le couplage à l'allumage (fig. 255, *b*). Lorsque les phases du réseau et de la machine coïncident, les lampes branchées suivant le schéma *a* s'éteindront et celles qui sont branchées suivant le schéma *b* seront allumées à éclat maximal. C'est à cet instant qu'il faut fermer l'interrupteur à couteaux de l'alternateur.

Pour les machines triphasées on branche les lampes de phase suivant deux schémas également : à l'extinction (fig. 256, *a*) et à l'allumage (fig. 256, *b*). Au début les lampes, branchées suivant le schéma *a* pour le même ordre de phases du réseau et de la machine, se mettront à clignoter d'une manière rapide et simultanée. Ensuite, leur clignotement deviendra de moins en moins fréquent, et lorsque

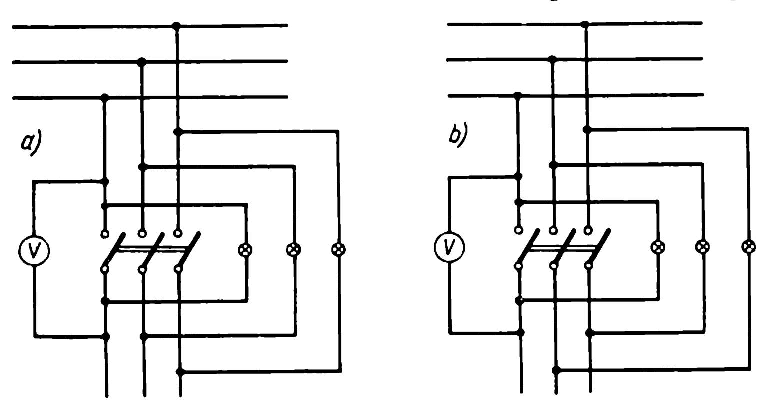


Fig. 256. Couplage des lampes de phase d'un alternateur triphasé : *a* — à l'extinction ; *b* — à la rotation de la lumière

les lampes s'éteindront lentement il faut fermer l'interrupteur à couteaux de l'alternateur.

Pour pouvoir déterminer d'une façon plus précise l'instant de fermeture de l'interrupteur, on utilise souvent un voltmètre à déviation bilatérale.

Lorsque l'ordre de phases du réseau et celui de la machine sont identiques, les lampes branchées suivant le schéma *b* clignoteront à tour de rôle et si on les dispose en cercle, on aura l'impression d'avoir une lumière tournante. La vitesse de rotation de la lumière dépend de la différence des fréquences. L'alternateur doit être branché à l'instant où les lampes branchées de façon croisée fourniront l'éclat maximal et la troisième lampe s'éteindra. Autrement dit, il convient de fermer l'interrupteur à l'instant où le sens de rotation de la lumière change.

Lorsque les phases se suivent dans un ordre qui n'est pas le même, c'est dans les lampes branchées suivant le schéma *a* que la lumière tourne, tandis que les lampes

branchées suivant le schéma *b* s'allument et s'éteignent simultanément. Pour changer l'ordre de phases de la machine, il faut intervertir deux fils quelconques aboutissant à l'interrupteur.

Le branchement des lampes de phase des alternateurs à haute tension se fait par l'intermédiaire des transformateurs de tension (chapitre 14, § 171).

De cette façon, en se servant des lampes de phase on peut déterminer l'opposition des phases, établir l'égalité des fréquences et l'ordre de phases du réseau et de la machine à coupler. L'ordre de phases de la machine peut être également déterminé avec un indicateur de phase qui est un petit moteur asynchrone.

Le sens de rotation du disque de cet appareil indique l'ordre de phases.

Lorsqu'un alternateur synchrone fonctionne en parallèle avec le réseau, sa vitesse de rotation reste constante et égale à celle de la vitesse de synchronisme.

La préparation d'un alternateur pour le couplage en parallèle est appelée *mise en synchronisme*.

Au cours de ces dernières années on utilise largement pour le couplage des alternateurs synchrones en parallèle la méthode dite *d'autosynchronisation*. Cette méthode est la suivante. A l'aide du moteur primaire on met en marche l'alternateur et on règle sa vitesse de façon qu'elle soit environ égale à la vitesse de synchronisme. On ferme l'enroulement d'excitation sur une résistance additionnelle dont la valeur est trois à cinq fois plus grande que la résistance de cet enroulement. On ferme l'interrupteur connectant l'alternateur au réseau. On commute l'enroulement d'excitation sur la source de tension constante qui alimente cet enroulement. Ensuite, l'alternateur se met en synchronisme de lui-même.

Faisons l'expérience suivante. Dans le circuit statorique d'un alternateur synchrone branchons un ampèremètre, un wattmètre et un phasemètre. Dans le circuit d'excitation de l'alternateur on branche un ampèremètre. Couplons l'alternateur en parallèle et faisons-le débiter dans une certaine charge active. En augmentant le courant d'excitation à l'aide d'un rhéostat inséré dans le circuit d'excitation, observons les indications des appareils. Il se trouve que la puissance active fournie par l'alternateur au réseau reste pratiquement constante et les indications du wattmè-

tre ne changent pas au cours de l'expérience. A charge ohmique constante, le courant dans le circuit statorique est minimal pour une certaine valeur du courant d'excitation. Cela correspond à un courant de charge purement ohmique de l'alternateur (cos φ = 1). Si l'on branche sur l'alternateur des charges ohmiques différentes, il se trouve

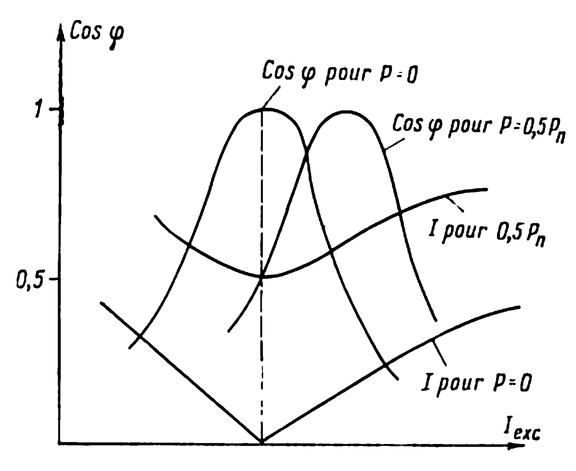


Fig. 257. Caractéristique en U d'un alternateur synchrone

qu'à chaque valeur de la charge ohmique correspond un courant d'excitation déterminé pour lequel cos φ = 1. Lorsque le courant d'excitation augmente au-delà de cette valeur, un courant réactif en retard sur la tension apparaît. Le phasemètre indique alors une diminution du cos φ et l'alternateur fournit au réseau une puissance réactive déphasée en arrière. Inversement, lorsqu'on diminue le courant d'excitation et il devient inférieur à la valeur indiquée, un courant réactif en avance sur la tension apparaît. Le phasemètre indique de nouveau une diminution du cos φ et pour créer son champ tournant l'alternateur prendra au réseau de la puissance réactive déphasée en arrière.

La variation du courant statorique (courant d'induit) d'un alternateur synchrone en fonction du courant d'excitation, pour une puissance active constante, est appelée *caractéristique en* U. On l'appelle ainsi à cause de la forme de la courbe qui rappelle la lettre U. La figure 257 montre une telle caractéristique d'un alternateur synchrone.

§ 130. ORGANISATION ET FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR SYNCHRONE

Un alternateur synchrone peut être utilisé comme moteur. Un tel moteur est appelé *moteur synchrone*. Les plus répandus sont les moteurs synchrones triphasés. Dans ces moteurs l'enroulement statorique est alimenté en courant alternatif triphasé et l'enroulement rotorique est connecté à une source de tension continue.

Lorsque les enroulements statoriques d'un moteur synchrone sont alimentés en courant triphasé, un champ magnétique tournant apparaît. La vitesse de rotation de ce champ dépend de la fréquence du courant alternatif et du nombre de pôles du stator. Pour une fréquence de 50 Hz, le moteur étant à deux pôles, le champ tourne à 3000 tr/mn. Avec quatre pôles il tourne à 1500 tr/mn, avec six pôles, à 1000 tr/mn, etc.

Mais si après le branchement du stator on injecte un courant continu dans l'enroulement du rotor, ce dernier ne bougera pas. Il ne peut pas démarrer de façon autonome. Cela s'explique par le fait que le champ magnétique du stator, qui a une grande vitesse de rotation par rapport au rotor immobile, ne peut pas lui communiquer instantanément la vitesse de synchronisme et le faire tourner étant donné la grande masse et, par conséquent, la grande inertie du rotor qui ne peut pas démarrer et développer la vitesse requise. Pour cette raison, le démarrage d'un moteur synchrone s'effectue à l'aide de dispositifs spéciaux.

Un moteur synchrone présente un grand avantage qui consiste en ceci: lors de faibles courants d'excitation du rotor il prend au réseau un courant réactif et fonctionne avec un cos φ en retard, mais en augmentant le courant d'excitation on peut faire de sorte que l'enroulement statorique n'absorbe pas de courant réactif et le cos φ sera égal à l'unité.

Si on continue à augmenter le courant d'excitation, le stator commence à fournir lui-même au réseau un courant réactif et le moteur synchrone, tout en supportant une charge mécanique, se transforme simultanément en un générateur de courant réactif ou de puissance réactive. Dans ce cas, le moteur est analogue à un condensateur et fonctionne avec un cos φ en avance.

Les récepteurs inductifs de courant alternatif (moteurs asynchrones, transformateurs) exigent de la puissance

réactive. Généralement, ils prennent cette puissance réactive (ou le courant réactif) à la centrale électrique. Si à côté de tels récepteurs fonctionne un moteur synchrone surexcité, on peut lui prendre de la puissance réactive au lieu de la prendre à la centrale. Cela contribue en même temps à améliorer le cos φ de l'installation et à diminuer le courant dans les fils venant de la centrale.

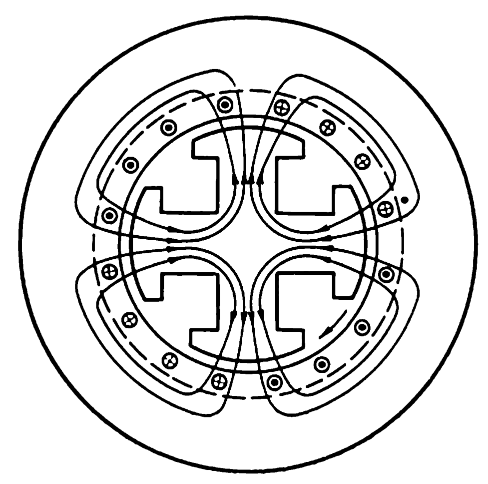


Fig. 258. Schéma d'un moteur synchrone à fer tournant

Un moteur synchrone destiné à améliorer le cos φ de l'installation est appelé *compensateur synchrone*.

Pour certains appareils de physique, le cinéma sonore, les tourne-disques, les installations de télémécanique et autres qui exigent une vitesse de rotation constante on emploie des moteurs synchrones de faible puissance à fer tournant (de quelques dizaines ou de quelques centaines de watts) (fig. 258).

Sur le stator de ces moteurs est placé un enroulement alimenté en courant alternatif (monophasé ou triphasé). Le rotor des moteurs à fer tournant est à pôles saillants. Mais à la différence des moteurs synchrones ordinaires il ne comporte pas d'enroulement d'excitation. Les lignes d'induction du champ tournant statorique tendent à suivre un itinéraire à réluctance minimale. De ce fait, le rotor tournera de façon que les axes de ses pôles coïncident avec le sens des lignes d'induction du champ statorique. Par

conséquent, le rotor tournera en synchronisme avec le champ statorique.

Les moteurs à fer tournant sont mis en marche par démarrage en asynchrone. Les moteurs de très faible puissance sont mis en vitesse à la main.

Comparés aux autres moteurs à courant alternatif, les moteurs synchrones à fer tournant ont un cos φ et un rendement peu élevés.

§ 131. PROPRIÉTÉS DES MOTEURS SYNCHRONES ET DOMAINES DE LEUR EMPLOI

Les moteurs synchrones présentent les avantages suivants:

1) vitesse de rotation constante à différentes charges;

2) cos φ élevé;

3) possibilité de compenser le cos φ. Faible dépendance de la puissance électromagnétique (et du couple électromagnétique) de la tension (ils dépendent de la tension à la puissance première, tandis que dans les moteurs asynchrones ils dépendent du carré de la tension).

Les défauts des moteurs synchrones: 1) impossibilité de régler la vitesse; 2) décrochage en cas de surcharge; 3) tendance au pompage (notons que ce défaut est absent dans les moteurs asynchrones).

Vu ces particularités, les moteurs synchrones sont surtout utilisés dans les installations fonctionnant de façon continue et pour actionner des machines à vitesse constante (pompes à pistons, pompes centrifuges, ventilateurs centrifuges, compresseurs, groupes moteur-générateurs, arbres de transmission, etc.).

Questions de contrôle

1) Quels sont les types d'alternateurs utilisés et quelle est leur organisation ?

2) Comment peut-on faire varier la tension d'un alternateur ?

3) Comment se manifeste la réaction d'induit dans les alternateurs synchrones ?

4) Comment doit-on coupler en parallèle un alternateur synchrone ?

5) Comment est organisé et comment fonctionne un moteur synchrone ?

6) Quels sont les avantages, les défauts et les applications d'un moteur synchrone ?

CHAPITRE XII

MACHINES À COURANT CONTINU

§ 132. ORGANISATION D'UNE DYNAMO

On appelle dynamo génératrice ou tout court dynamo ou génératrice une machine électrique qui transforme l'énergie mécanique du moteur primaire qui l'entraîne en énergie électrique de courant continu que la machine fournit aux récepteurs. La figure 259 montre la vue d'ensemble d'une dynamo. La figure 260 donne les coupes longitudinale et transversale d'une telle machine. Le fonctionnement d'une dynamo est basé sur le principe d'induction

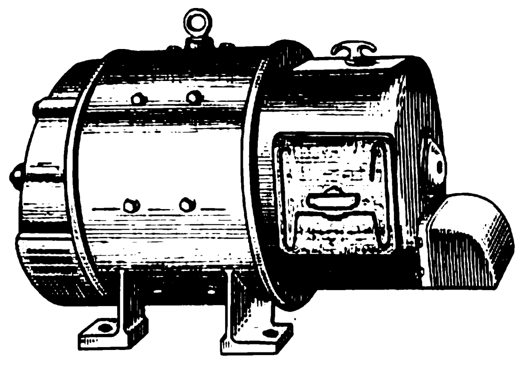


Fig. 259. Vue d'ensemble d'une dynamo

électromagnétique. Pour cette raison, ses principales parties sont un induit comportant un enroulement et un inducteur (électro-aimants) qui produit un champ magnétique.

L'induit de forme cylindrique est constitué de tôles d'acier magnétique découpées, de 0,5 mm d'épaisseur. Les tôles sont isolées l'une de l'autre par une couche de vernis ou de papier fin. Les échancrures découpées suivant la circonférence de chaque tôle forment, après le montage

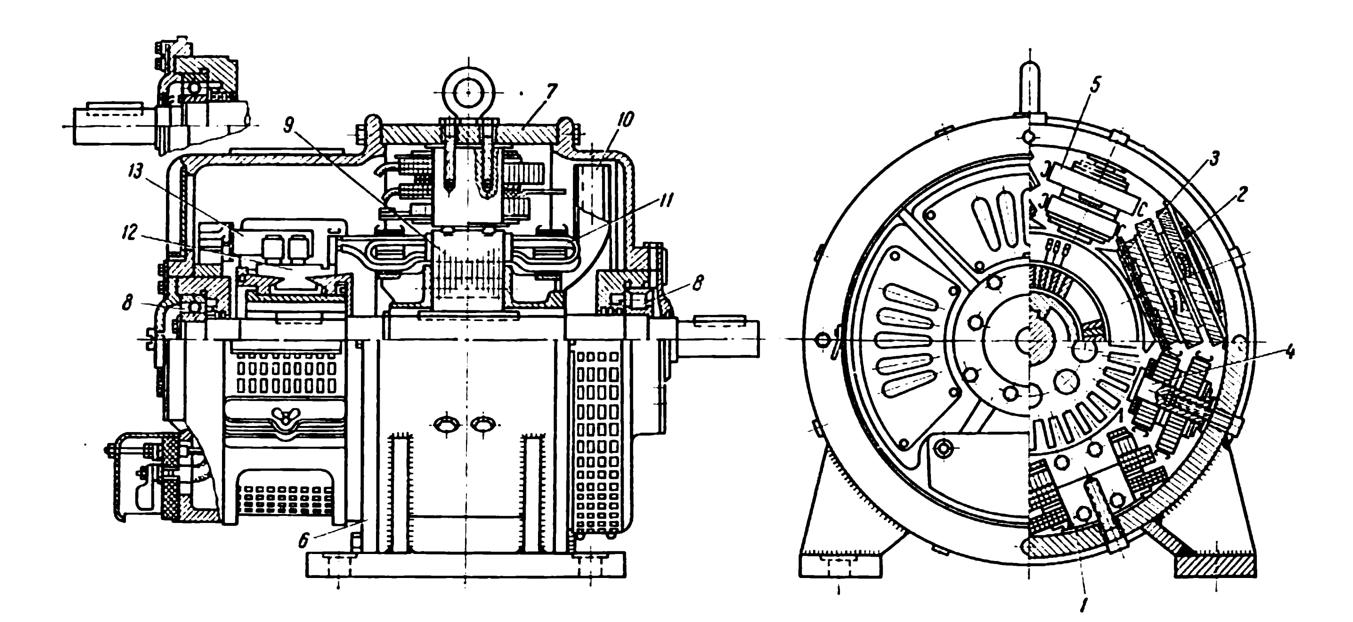


Fig. 260. Coupes longitudinale et transversale d'une machine à courant continu :
1 — noyau d'un pôle principal ; *2* — bobine d'un pôle principal ; *3* — pièce polaire ; *4* — noyau d'un pôle auxiliaire ; *5* — bobine d'un pôle auxiliaire ; *6* — carcasse ; *7* — culasse ; *8* — flasque ; *9* — armature d'induit ; *10* — ventilateur ; *11* — enroulement d'induit ; *12* — collecteur ; *13* — doigt de porte-balais

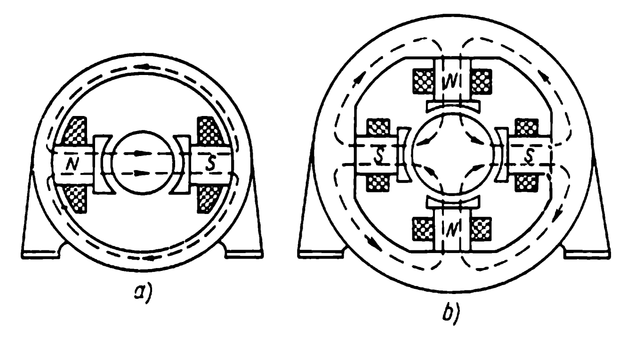


Fig. 261. Carcasses des machines à courant continu :
a — à deux pôles ; *b* — à quatre pôles

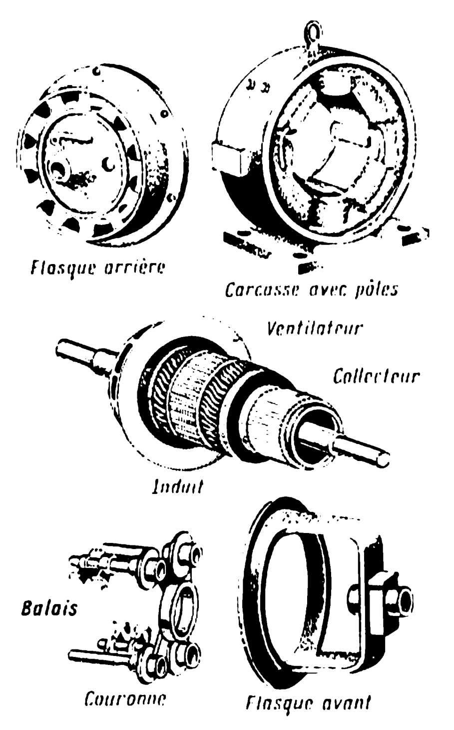


Fig. 262. Machine à courant continu démontée

de l'induit et le serrage des tôles, des encoches où sont logés les conducteurs isolés de l'enroulement d'induit.

Sur l'arbre de l'induit est fixé un collecteur composé de lames de cuivre soudées à des endroits bien déterminés

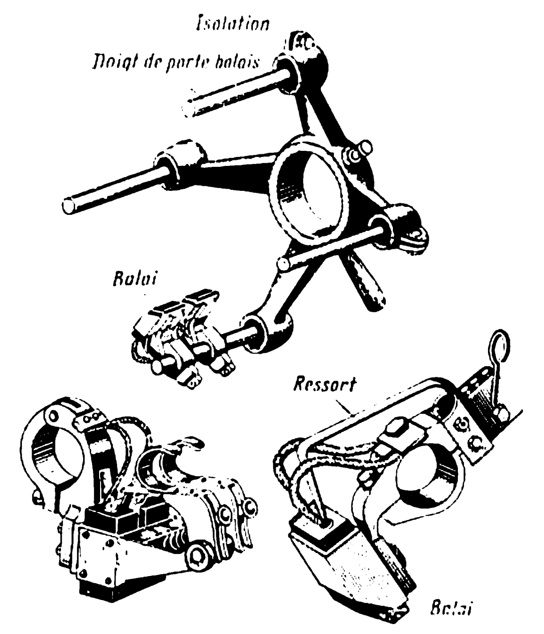


Fig. 263. Couronne et porte-balais

de l'enroulement d'induit. Ces lames sont isolées l'une de l'autre par de la micanite. Le collecteur sert à redresser le courant et à l'évacuer vers le circuit extérieur par l'intermédiaire de balais fixes.

Les électro-aimants se composent de noyaux en acier fixés par des boulons à la carcasse de la machine. La carcasse est en acier coulé. Dans des machines de très faible puissance la carcasse et les noyaux polaires sont coulés ensemble et font corps unique. Dans d'autres cas, les noyaux des pôles sont assemblés de tôles d'acier magnétique. Sur les noyaux sont placées des bobines en fil de cuivre isolé. Le courant continu circulant par l'enroulement d'excitation crée le flux magnétique des pôles. Pour mieux répartir le flux dans l'entrefer on fixe à l'armature des pôles avec pièces

polaires en tôles d'acier. Dans la plupart des cas, le pôle est estampé avec la pièce polaire. Sur la figure 261 on voit l'organisation schématique d'une carcasse à deux pôles et d'une autre à quatre pôles.

Une machine à courant continu démontée est présentée sur la figure 262.

Le circuit extérieur est connecté au circuit de l'induit d'une machine à courant continu par l'intermédiaire de balais fixés dans les porte-balais qui sont montés sur les doigts de la couronne. Les doigts sont isolés de la couronne par des douilles et des rondelles isolantes. Sur la figure 263 sont représentés une couronne et des porte-balais avec balais.

Lors de la rotation de l'induit son enroulement coupe les lignes d'induction des pôles. D'après la loi d'induction électromagnétique, dans les conducteurs de l'enroulement d'induit est induite une force électromotrice dont la valeur peut être calculée par la formule :

$$e = Blv \sin \alpha,$$

où B est l'induction magnétique des pôles exprimée en $\frac{\mathrm{V \cdot s}}{\mathrm{m^2}}$;

l est la longueur active des conducteurs de l'induit en m ;

v est la vitesse linéaire des conducteurs de l'induit en $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$;

α est l'angle entre la direction de la vitesse de mouvement du conducteur et la direction du vecteur d'induction magnétique.

§ 133. DESTINATION ET CONSTITUTION D'UN COLLECTEUR

Lorsque l'induit tourne dans le champ magnétique des pôles, dans les conducteurs de son enroulement est induite une F.É.M. variable en grandeur et en sens. Or, si on soude les extrémités d'une spire à deux bagues de cuivre et on place sur ces bagues des balais connectés à un circuit extérieur, il se fait que lors de la rotation de la spire dans le champ magnétique un courant alternatif apparaît dans le circuit fermé (fig. 264). C'est le principe de fonctionnement des alternateurs.

Mais si on réunit les extrémités de la spire à deux demi-bagues de cuivre, isolées l'une de l'autre (appelées lames

du collecteur) sur lesquelles on place des balais, il se fait que lors de la rotation de la spire dans le champ magnétique (fig. 265) dans celle-ci sera toujours induite une F.É.M. variable. Cependant, dans le circuit extérieur circulera un courant de sens constant variant en grandeur (courant ondulé). Examinons maintenant la figure 266. On y voit un induit en anneau avec une seule spire. Le fil d'entrée

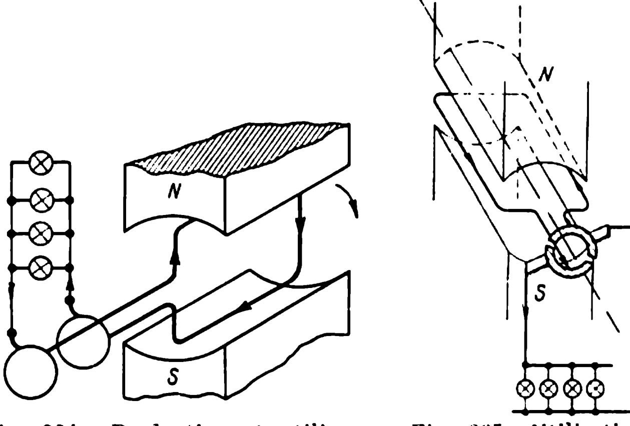


Fig. 264. Production et utilisation du courant alternatif

Fig. 265. Utilisation d'un collecteur

E de la spire est soudé à la lame du collecteur *a* et le fil de sortie *S* à la lame *b*. Contre les lames du collecteur sont appliqués deux balais fixes connectés au circuit extérieur. Examinons trois positions caractéristiques de la spire dans l'espace entre les pôles. Dans la position *a* (fig. 266), la spire se trouve dans la zone d'action du pôle *N*. En tenant compte du sens de rotation de l'induit, on détermine le sens de la F.É.M. induite dans la spire d'après la règle de la main droite. On doit également tenir compte du fait que la F.É.M. n'est induite que dans la partie de la spire se trouvant au-dessus de l'induit et c'est justement à cause de la mauvaise utilisation de son enroulement que l'induit en anneau n'est pas employé actuellement. Le courant dans cette position est dirigé depuis l'entrée de la spire vers sa sortie. Par le balai droit il se dirige vers le circuit extérieur. On peut donc appeler ce balai, balai positif. Après le passage par le circuit extérieur, le courant arrive au balai gauche de la dynamo qu'on peut appeler balai négatif.

Dans la position *b* de la figure 266, la spire se trouve sur la ligne neutre. On appelle *ligne neutre* ou *ligne neutre théorique* la ligne qui passe par le centre de l'induit et est perpendiculaire à l'axe des pôles. Le côté actif de la spire dans cette position glisse le long des lignes d'induction sans les couper. De ce fait, aucune F.É.M. n'est induite

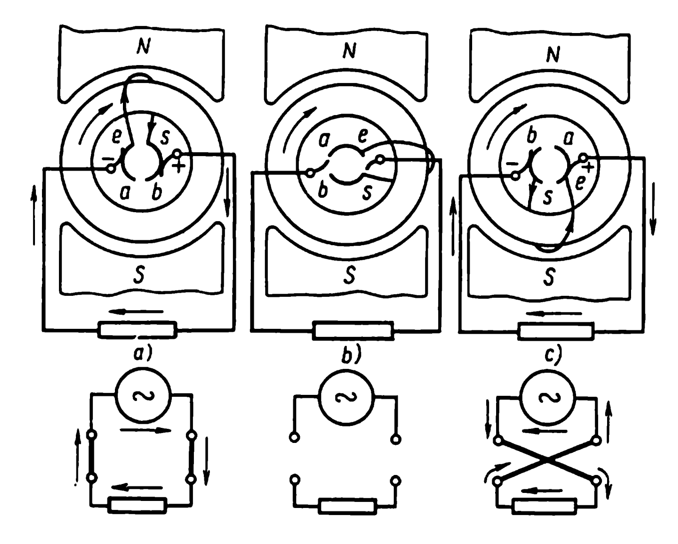


Fig. 266. Destination du collecteur dans les dynamos

dans la spire et le courant dans le circuit est nul. La largeur du balai est supérieure à celle du pas au collecteur formé par la lame et l'intervalle isolant de sorte que la spire se trouvant sur la ligne neutre est court-circuitée à cet instant par les balais.

Dans la position *c*, la spire se trouve dans la zone d'action du pôle *S*. En déterminant le sens de la F.É.M. induite dans la spire, on trouve que le courant est dirigé de la sortie de la spire vers son entrée. Si la lame *a* du collecteur était toujours en contact avec le balai gauche et la lame *b* avec le balai droit, le changement de sens du courant dans la spire provoquerait un changement de sens du courant dans le circuit extérieur. Mais cela n'a pas lieu maintenant, car le changement de sens du courant dans la spire après son passage par la ligne neutre coïncide avec l'instant où la lame *a* arrive sous le balai droit et la lame *b* sous le balai gauche.

En comparant la première et la troisième position il est facile de voir que dans les deux cas le courant se dirige vers le circuit extérieur à partir du balai droit positif et revient par le balai gauche négatif. Dans le circuit extérieur le sens du courant ne change pas. Etant donné que la spire occupe différentes positions dans le champ magnétique, la F.É.M. induite dans la spire et, par conséquent, le courant dans le circuit extérieur varient en grandeur.

La figure 267 montre comment varie le courant dans le circuit extérieur. Un tel courant de sens unique et de grandeur variable est appelé *courant ondulé*. Pour augmenter la tension aux bornes de la machine on place sur l'induit plusieurs spires ou bobines comprenant un grand nombre de spires en fil isolé. En disposant sur l'induit deux bobines comme il est indiqué sur la figure 268, *a*, on obtient une connexion en parallèle des bobines et la tension fournie par la dynamo est égale à la tension créée par une bobine. Le courant dans le réseau sera égal à la double valeur du courant circulant dans chaque bobine. Disposons sur l'induit quatre bobines décalées de 90° l'une par rapport à l'autre et montons-les en série (fig. 268, *b*). Augmentons le nombre de lames du collecteur de façon qu'il soit égal à quatre. Nous déterminerons le sens de la F.É.M. induite dans les bobines d'après la règle de la main droite.

Sur la figure 269 sont indiquées les courbes des F.É.M. des bobines *1* et *2*. Puisque les bobines sont décalées dans l'espace de 90°, les courbes des F.É.M. sont également déphasées de 90°. Les courbes des F.É.M. des bobines *3* et *4* sont de même nature que celles des bobines *1* et *2* avec cette différence que les F.É.M. des bobines *1* et *3* d'une part et des bobines *2* et *4* d'autre part sont égales en grandeur, mais sont de sens opposés. Donc, pour élucider la question nous nous limiterons à examiner les courbes des F.É.M. produites par les bobines *1* et *2*. Puisque les bobines sont connectées en série, la valeur instantanée de la F.É.M. e_{tot} créée par les deux bobines est égale à la somme des valeurs instantanées des F.É.M. de chaque bobine. Sur la figure 270 est indiquée l'addition des valeurs instantanées des F.É.M. des deux bobines. La courbe de la F.É.M. résultante a une ondulation plus petite que celle des F.É.M. des bobines séparées. La F.É.M. totale des bobines qui se trouvent sous l'autre pôle (*3* et *4*) a la même valeur, mais est de sens opposé à celui de la F.É.M. totale des bobines *1* et *2*.

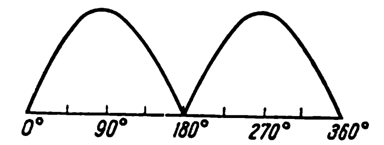


Fig. 267. Courant ondulé

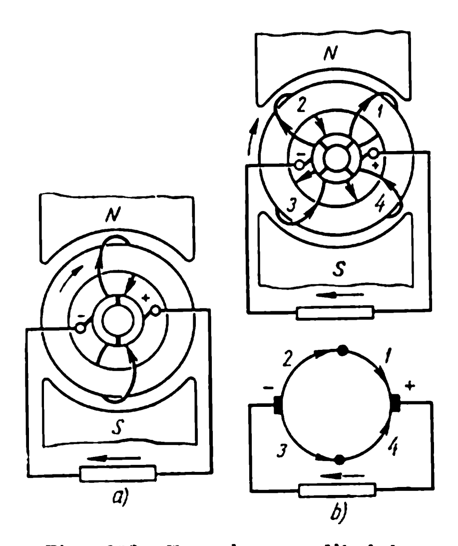


Fig. 268. Enroulement d'induit:
a — une paire de bobines sur l'induit; b — deux paires de bobines sur l'induit

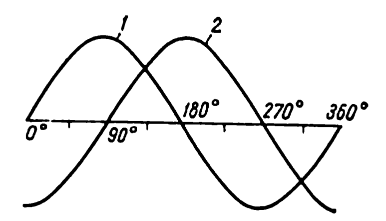


Fig. 269. Courbes des F.É.M. de deux bobines voisines situées sur l'induit comme l'indique la fig. 268, b

Les deux F.É.M sont couplées en parallèle par rapport aux balais de la machine.

La somme des F.É.M. instantanées de huit bobines placées sur l'induit donne, comme l'indique la figure 271,

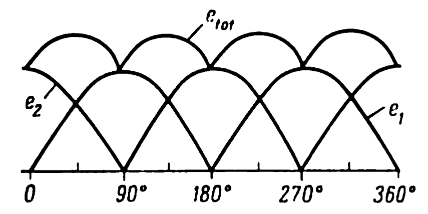


Fig. 270. Construction de la F.É.M. redressée totale de deux bobines

une F.É.M. e_{tot} dont les ondulations sont encore plus petites que dans le cas précédent. Ainsi, en disposant sur l'induit un grand nombre de conducteurs et en augmentant respectivement le nombre de lames du collecteur on peut obtenir une F.É.M. dont les ondulations sont tellement insignifiantes que le courant fourni au réseau peut être considéré

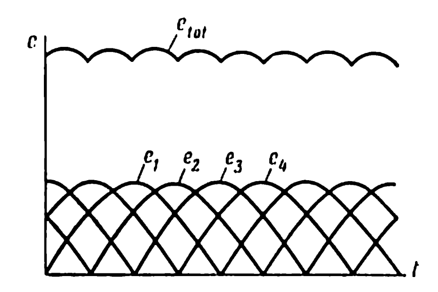


Fig. 271. Construction de la F.É.M. totale de quatre bobines

comme un courant continu. Par exemple, avec 16 bobines sur l'induit, les oscillations de la F.É.M. sont inférieures à 1 %. Dans les machines modernes le nombre de bobines sur l'induit est souvent supérieur à cent.

En achevant l'examen du fonctionnement du collecteur on arrive à la conclusion que le collecteur dans les dynamos sert à transformer la F.É.M. alternative induite dans l'enroulement d'induit en une F.É.M. continue aux balais de la machine. Remarquons que si l'on munit l'induit de la

dynamo d'un collecteur et de bagues, on peut obtenir en même temps une tension continue et une tension alternative.

Le collecteur que montre la figure 272 comprend des lames de cuivre étiré à froid. Entre les lames du collecteur sont placées des lamelles de micanite (de mica) de 0,5 à 1 mm d'épaisseur. Les lames du collecteur ont un ergot en queue

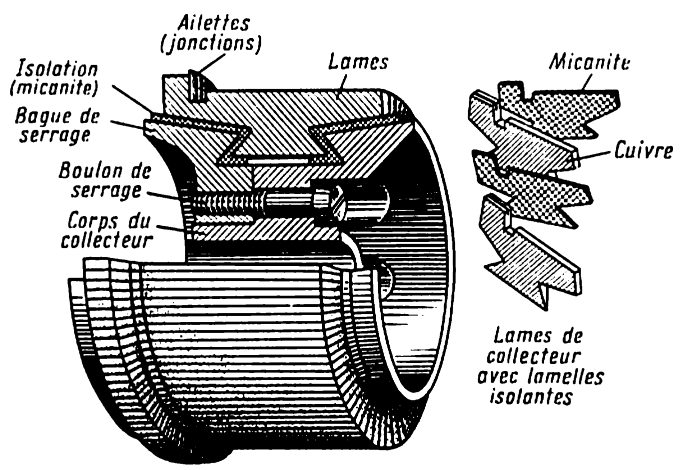


Fig. 272. Coupe d'un collecteur

d'aronde. Sur l'arbre, du côté de l'induit, est placée une douille isolante qui par son extrémité conique pénètre dans l'échancrure de la queue d'aronde. De l'autre côté, les lames du collecteur sont maintenues par un disque isolant dont les ergots pénètrent également dans les échancrures de la queue d'aronde. Pour que les lames du collecteur ne se séparent pas, la douille et les disques isolants sont serrés par des boulons.

Pour souder (à l'étain) les conducteurs de l'enroulement d'induit aux lames du collecteur, on utilise des lames de cuivre spéciales appelées *jonctions* ou *ailettes*.

§ 134. ENROULEMENT D'INDUIT

Les conducteurs de l'induit branchés d'après un schéma déterminé forment l'enroulement d'induit. Les machines à courant continu modernes ont un induit en tambour avec encoches situées suivant la çirconférence et dans lesquel-

les est logé l'enroulement. Les encoches peuvent être ouvertes, semi-fermées ou fermées. Mais on utilise presque exclusivement les encoches des deux premiers types. Les encoches de ces deux formes permettent de confectionner l'enroulement d'induit séparément sur gabarits métalliques ou en bois. Ensuite, les parties pliées de l'enroulement, isolées

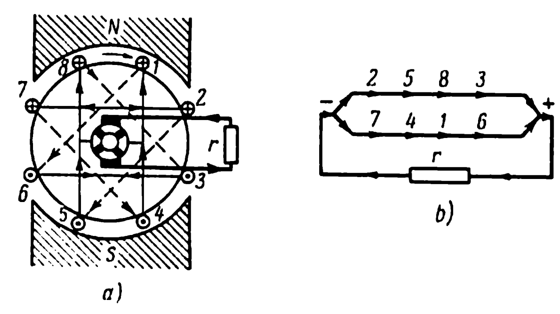


Fig. 273. Enroulements d'un induit en tambour d'une dynamo bipolaire

au ruban coton ou au tissu vernis, sont placées dans les encoches. Pour augmenter la rigidité diélectrique de l'isolation de l'enroulement on l'imprègne d'un vernis isolant. Cette méthode de confection de l'enroulement réduit le temps de montage de la machine ainsi que son prix de revient. Avant de placer l'enroulement dans les encoches de l'induit, on y place des boîtes en forme de U en fibre ou en presspahne. Après la mise de l'enroulement dans les encoches on y enfonce des coins en bois ou en fibre. Ensuite, on place sur les parties frontales de l'enroulement d'induit des frettes en fil d'acier étamé qui sont ensuite soudées.

Plaçons sur l'induit huit conducteurs et numérotons-les (fig. 273, *a*). En nous servant de la règle de la main droite et en tenant compte du sens de rotation de l'induit, connectons les conducteurs entre eux de façon que leurs F.É.M. s'ajoutent. La valeur de la F.É.M., les conducteurs étant connectés en série, sera maximale lorsque le conducteur qui se trouve sous le milieu d'un pôle est réuni au conducteur qui se trouve sous le milieu d'un autre pôle, par exemple, lorsqu'on réunit le conducteur *8* au conducteur *4*, le conducteur *5* au conducteur *1*, etc. Deux conducteurs connectés en série forment une spire ou une bobine. Huit conducteurs formeront donc quatre bobines. Le collecteur doit alors

avoir quatre lames. La largeur d'une spire est alors égale à un pas polaire. Mais la nécessité de réunir un conducteur avec un autre conducteur qui se trouve également sous le milieu d'un autre pôle et la nécessité de brancher tous les conducteurs dans l'enroulement obligent de faire la largeur de la spire inférieure au pas polaire.

Dans l'exemple considéré, le conducteur *1* est connecté à l'arrière de l'induit avec le conducteur *6*. Cette connexion qui n'est pas visible du côté du collecteur est figurée en pointillé. Le conducteur *6* est réuni du côté frontal au conducteur *3*, ce qui est représenté par un trait continu. Ensuite les conducteurs sont connectés dans l'ordre suivant: *3-8*, *8-5*, *5-2*, *2-7*, *7-4*, *4-1*. Les connexions des conducteurs de l'induit peuvent être représentées aussi de façon suivante: *1--6 —3--8—5--2—7--4—1* [1]).

Il en résulte que tous les conducteurs sont connectés et l'enroulement est fermé. En réunissant les connexions de la face avant des conducteurs aux lames correspondantes du collecteur et en déterminant le sens de courant dans les connexions de face, on voit que le courant venant des conducteurs *3* et *6* arrive à la lame *2* du collecteur. Depuis la lame *4* du collecteur le courant bifurque et passe par les conducteurs *2* et *7* de l'induit. En appliquant contre les lames *2* et *4* du collecteur un balai réuni au réseau extérieur, on permet au courant de se diriger depuis la lame *2* vers le réseau. Ayant traversé les résistances du réseau extérieur, le courant revient au balai appliqué contre la lame *4* du collecteur. Ensuite, le courant circule par les conducteurs de l'enroulement d'induit. Le balai qui touche la lame *2* sera positif et celui qui touche la lame *4* sera négatif. En comparant les enroulements d'un induit en anneau et ceux d'un induit en tambour on peut noter que dans un induit en anneau les balais se trouvent sur la ligne neutre théorique tandis que dans un induit en tambour les balais se trouvent sous les milieux des pôles.

La figure 273, *b* montre le parcours du courant par deux branches parallèles formées par les conducteurs de l'enroulement pour la position de l'induit indiquée sur la figure 273, *a*. Les F.É.M. induites dans chaque branche

---

[1]) Les traits continus (—) indiquent la connexion de la face avant de l'induit et les traits en pointillé (--) indiquent la connexion de la face arrière.

sont égales et dirigées dans le même sens. Lors de la rotation de l'induit, les différents conducteurs font partie de l'une ou de l'autre branche parallèle.

Considérons l'enroulement d'induit d'une dynamo tétrapolaire. Plaçons sur l'induit 16 conducteurs (fig. 274, *a*) qui forment huit spires ou bobines. Le collecteur comprendra hui tlames. En nous servant de la règle de la main droite

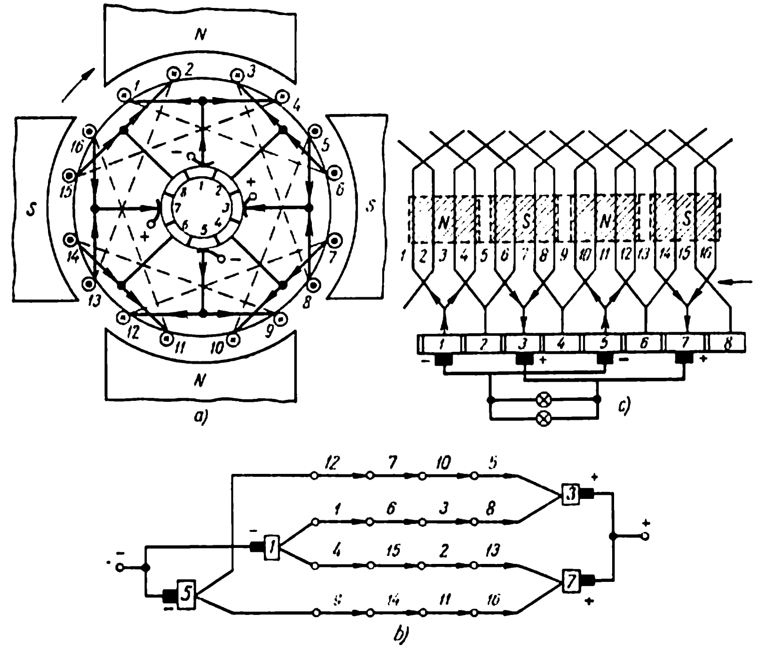


Fig. 274. Enroulement imbriqué d'induit d'une dynamo tétrapolaire : *a* — schéma de disposition de l'enroulement ; *b* — répartition du courant dans les conducteurs de l'enroulement ; *c* — schéma développé

et en tenant compte du sens de rotation de l'induit, déterminons le sens de la F.É.M. induite dans les conducteurs. En utilisant la notation conventionnelle de connexion des conducteurs, on obtient : *1—6—3—8—5—10—7—12—9—14—11—16—13—2—15—4—1*.

Tous les conducteurs sont réunis et l'enroulement est fermé. En marquant le sens de courant dans les connexions de face avant on voit que les courants venant des conducteurs *5* et *8* se rencontrent et se dirigent vers la lame *3* du

collecteur. A la lame *7* arrivent les courants venant des conducteurs *13* et *16*. Le courant venant de la lame *1* du collecteur se divise pour circuler dans les conducteurs *1* et *4*. Le courant venant de la lame *5* se divise pour circuler dans les conducteurs *9* et *12*. Les balais qui touchent les lames *3* et *7* du collecteur sont positifs et ceux qui touchent les lames *1* et *5* sont négatifs. En réunissant les balais deux par deux, on sort sur la plaque à bornes de la machine les bornes « + » et « — ».

La figure 274, *b* montre l'itinéraire du courant à travers les conducteurs lorsque l'induit occupe la position indiquée sur la figure 274, *a*. L'enroulement de la dynamo comporte alors quatre branches parallèles. Le courant dans le circuit extérieur sera quatre fois plus grand que celui qui circule dans les conducteurs de l'enroulement d'induit d'une dynamo tétrapolaire. Les dynamos multipolaires permettent d'augmenter la puissance fournie par la machine au réseau. Une dynamo hexapolaire aura six branches parallèles et six balais (trois positifs et trois négatifs).

Souvent pour plus de clarté on représente l'enroulement sous forme développée. Un schéma développé de l'enroulement d'induit de la figure 274, *a* est indiqué sur la figure 274, *c*. En examinant la figure 274, *c* on voit que l'enroulement est en forme de boucles et on l'appelle *enroulement imbriqué* ou *parallèle*, car l'enroulement d'induit forme des branches parallèles. Mais l'enroulement imbriqué n'est pas le seul à être utilisé.

On obtenait un enroulement imbriqué lorsqu'on connectait un conducteur se trouvant sous un pôle à un conducteur se trouvant sous un autre pôle, et, en allant vers le troisième conducteur, on revenait sous le premier pôle. Mais si on réunit le deuxième conducteur à un conducteur qui se trouve sous le pôle suivant (troisième), on obtient un autre enroulement dont la forme rappelle celle d'une onde et cet enroulement est appelé *enroulement ondulé*.

Sur la figure 275, *a* est indiqué un enroulement ondulé avec 18 conducteurs pour une dynamo tétrapolaire. En tenant compte du sens de rotation de l'induit et en utilisant la règle de la main droite, on détermine le sens de F.É.M. induite dans les conducteurs des enroulements. En utilisant la notation adoptée des connexions des conducteurs, on obtient: *1---6—11---16—3---8—13---18—5---10—15---2—7---12—17---4—9---14—1*. Tous les conduc-

teurs se trouvent connectés et l'enroulement est fermé. Les connexions de face avant sont réunies à neuf lames du collecteur. Aux lames *2*, *4*, *6* et *9* on applique deux balais positifs et deux balais négatifs. La figure 275, *b* montre la marche du courant dans les conducteurs de l'enroulement,

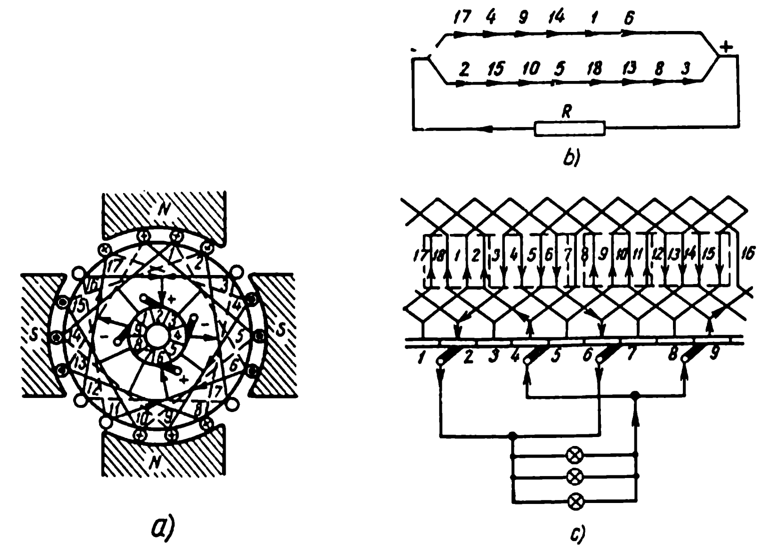


Fig. 275. Enroulement ondulé de l'induit d'une dynamo tétrapolaire : *a* — schéma de l'enroulement; *b* — itinéraire du courant dans l'enroulement; *c* — schéma développé

lorsque l'induit occupe la position montrée sur la figure 275, *a*. En examinant la figure 275, *b* on note l'existence de deux branches parallèles formées par l'enroulement d'induit. Il se trouve qu'un enroulement ondulé d'une dynamo à nombre de pôles quelconque peut avoir seulement deux circuits parallèles. A la différence de l'enroulement imbriqué qui est parallèle et où le nombre de branches parallèles de l'induit est égal au nombre de pôles, l'enroulement ondulé est appelé *enroulement série*. L'induit occupant la position indiquée sur la figure 275, *a*, les spires *7*—*12* et *11*—*16* ne participent pas à la création de la F.É.M., car elles sont court-circuitées par les balais. Le courant qui parcourt les spires en court-circuit est peu intense si l'on tient compte du fait que les spires se trouvent près de la zone neutre et la F.É.M. induite dans ces spires est très

faible. Sur la figure 275, *c* est indiqué le schéma développé de l'enroulement, l'induit occupant la position montrée sur la figure 275, *a*.

Dans les dynamos prévues pour une tension élevée on préfère l'enroulement ondulé. Une irrégularité de l'entrefer, une inégalité de la forme des pièces polaires, un centrage incorrect de l'induit provoquent l'apparition dans les conducteurs de l'enroulement d'induit des F.É.M. de valeurs

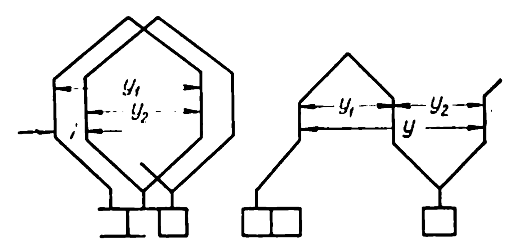


Fig. 276. Calcul du pas d'un enroulement imbriqué et d'un enroulement ondulé

différentes. Puisque les éléments de l'enroulement imbriqué se trouvent sous un même pôle, cela provoque l'apparition de différentes F.É.M. dans les branches parallèles, ce qui à son tour fait circuler des courants de compensation dans l'enroulement d'induit. L'enroulement ondulé n'a pas ce défaut. La non-uniformité du système magnétique due à la différence de flux dans les diverses parties du circuit magnétique qui à son tour est provoquée soit par la position excentrique de l'induit par rapport aux pôles, soit par des soufflures apparues lors du moulage de la carcasse, influe peu sur l'enroulement ondulé, car ses sections se trouvent sous des pôles différents. Pour cette raison, la non-uniformité indiquée influe presque de la même façon sur les valeurs des F.É.M. induites dans les branches parallèles de l'enroulement d'induit. Dans les machines de grande puissance et de basse tension, où le courant fourni par la dynamo au réseau est fort, il est plus avantageux de diviser l'enroulement d'induit en un grand nombre de branches parallèles, c'est-à-dire d'utiliser un enroulement imbriqué.

On appelle section la partie de l'enroulement (fig. 276) qui se trouve entre deux lames du collecteur situées l'une après l'autre. La section se compose de deux côtés actifs dont chacun comporte un ou plusieurs conducteurs. La

distance suivant la circonférence de l'induit entre les côtés initial et final actifs d'une section est appelée premier pas partiel ou pas arrière (y_1) et la distance entre le côté actif final d'une section et le côté initial de la section suivante est appelée second pas partiel ou pas avant (y_2). La distance entre les côtés actifs initiaux de deux sections voisines est appelée pas résultant (y).

Sur la figure 276 sont indiquées les sections d'un enroulement imbriqué et d'un enroulement ondulé. Le dessin montre que le pas résultant d'un enroulement imbriqué est égal à la différence des pas partiels:

$$y = y_1 - y_2.$$

Le pas résultant d'un enroulement ondulé est égal à la somme des pas partiels:

$$y = y_1 + y_2.$$

En revenant à l'enroulement imbriqué représenté par la fig. 274, *a*, on trouve que pour cet enroulement le premier pas partiel est égal à 5 et le second pas partiel est égal à 3[1]). En faisant l'enroulement depuis le premier conducteur, on obtient:

$$1+5=6;\ 6-3=3;\ 3+5=8;\ 8-3=5, \text{ etc.}$$

Pour l'enroulement ondulé indiqué sur la figure 275, *a* on obtient: $y_1 = 5$; $y_2 = 5$ et, pour cette raison, en faisant l'enroulement depuis le premier conducteur, on obtient:

$$1+5=6;\ 6+5=11;\ 11+5=16;\ 16+5=21;$$
$$21-18=3, \text{ etc.}$$

Les côtés actifs d'une section comportent généralement plusieurs conducteurs. Dans ce cas, les conducteurs d'une section sont isolés ensemble et placés dans les encoches correspondantes.

§ 135. VALEUR DE LA F.É.M. D'UNE DYNAMO

Déduisons la formule permettant de calculer la valeur de la F.É.M. induite dans une machine à courant continu.

---

[1]) On admet comme unité la distance entre deux conducteurs adjaçants suivant la circonférence de l'induit.

On sait que la valeur de la F.É.M. induite est proportionnelle à la vitesse de variation dans le temps du flux magnétique :

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Durant un tour complet de l'induit d'une dynamo bipolaire, chaque conducteur de l'enroulement d'induit coupe deux fois le champ magnétique de la machine. Si la vitesse de rotation de la machine est $\frac{n}{60}$ tr/s, le nombre de lignes d'induction coupées par le conducteur en une unité de temps est :

$$2\Phi\frac{n}{60}.$$

La valeur de la F.É.M. est donc :

$$e = 2\Phi\frac{n}{60}\ \text{V}.$$

Si l'enroulement d'induit comporte deux branches parallèles, le nombre total de conducteurs étant N, chaque branche comportera $\frac{N}{2}$ conducteurs. La F.É.M. induite dans chaque branche sera déterminée par l'expression suivante :

$$e = 2\Phi\frac{n}{60}\cdot\frac{N}{2}\ \text{V}.$$

Jusqu'à présent nous avons considéré une dynamo à deux pôles avec $p = 1$ ou $2p = 2$. Dans une machine comportant $2p$ pôles, le nombre de lignes d'induction coupées par un conducteur pendant un tour de l'induit sera $2p\Phi$ et non pas 2Φ.

La valeur de la F.É.M. induite sera alors :

$$e = 2p\Phi\frac{n}{60}\cdot\frac{N}{2}\ \text{V}.$$

Si l'enroulement d'induit comporte $2a$ branches et non pas deux branches parallèles ($a = 1$, $2a = 2$), le nombre de conducteurs dans chaque branche sera $\frac{N}{2a}$ et la F.É.M. de la dynamo sera déterminée par l'expression :

$$e = 2p\Phi\frac{n}{60}\cdot\frac{N}{2a}\ \text{V}.$$

Définitivement, on peut calculer la F.É.M. d'une dynamo d'après la formule suivante:

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \Phi N.$$

Exemple 1. Calculer la F.É.M. d'une dynamo dont $\Phi_{\text{utile}} = 0{,}0368$ V·s ; $N = 500$; $n = 750$ tr/mn ;

$$2p = 6\ ;\quad 2a = 6.$$

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \Phi N = \frac{3}{3} \cdot \frac{750}{60} \cdot 0{,}0368 \cdot 500 = 230 \text{ V}.$$

§ 136. RÉACTION D'INDUIT. COMMUTATION. PÔLES AUXILIAIRES

Lorsqu'une dynamo marche à vide, le courant d'induit est, selon le type de machine, soit très petit, soit nul. Dans ce cas, le champ magnétique créé par l'enroulement des pôles (enroulement d'excitation) d'une dynamo bipolaire a la forme représentée sur la figure 277, *a*. Comme nous l'avons indiqué plus haut, la ligne passant par le milieu des pièces polaires est appelée axe des pôles. L'axe du champ magnétique coïncide avec l'axe des pôles.

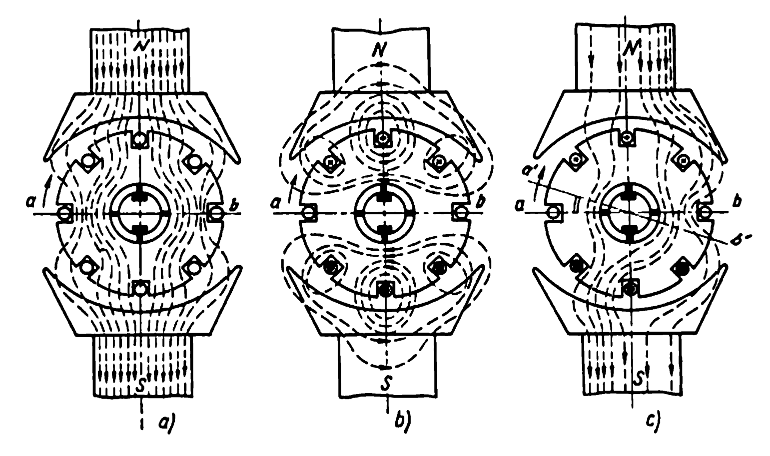


Fig. 277. Réaction d'induit d'une dynamo

La ligne perpendiculaire à l'axe du champ magnétique, la *ligne neutre magnétique*, coïncide dans ce cas avec la ligne neutre théorique (ligne *a—b*).

Lorsque la dynamo débite dans un réseau extérieur l'enroulement d'induit est parcouru par un courant qui crée son champ magnétique propre, c'est-à-dire le champ d'induit (fig. 277, *b*). La superposition des deux champs magnétiques (celui des pôles et celui de l'induit) engendre un champ magnétique résultant. Sur la figure 277, *c* est indiqué le tableau du champ résultant d'une dynamo. L'action du champ magnétique de l'induit sur celui des pôles est appelée *réaction d'induit*. Le champ d'induit, en agissant sur le champ magnétique des pôles, provoque:

1. Une désaimantation de la corne d'entrée du pôle, où les sens des lignes d'induction des champs du pôle et de l'induit sont opposés, et une aimantation de la corne de sortie du pôle, où les lignes d'induction des champs du pôle et de l'induit sont dirigées dans le même sens. Pour une faible valeur de l'induction magnétique dans le noyau du pôle, la désaimantation de la moitié du pôle est égale à l'aimantation de l'autre moitié. Lorsque l'induction est grande, par suite de la saturation, l'affaiblissement du flux magnétique dans une moitié du pôle n'est pas compensé par son renforcement dans l'autre moitié et il en résulte que le flux de la dynamo diminue et la tension de la machine baisse.

2. Une déformation du champ de la machine et un déplacement de la ligne neutre magnétique dans le sens de rotation de la dynamo (positions a' et b' sur la fig. 277, *c*). La valeur de l'angle de déplacement de la ligne neutre théorique dépend de la valeur du champ magnétique de l'induit qui à son tour dépend du courant dans l'enroulement d'induit, c'est-à-dire de la charge de la dynamo.

3. La nécessité de décaler les balais dans le sens de rotation de l'induit afin d'éviter la production de fortes étincelles. Pour ne pas être obligé à décaler tout le temps les balais lors de la variation continue de la charge de la dynamo, on utilise des pôles auxiliaires spéciaux dont l'action sera analysée plus loin.

Lors de la rotation de l'induit de la dynamo, les conducteurs de l'enroulement passent d'une branche parallèle à une autre. Cela a lieu à l'instant où les sections de l'enroulement en traversant un pôle coupent la ligne neutre magnétique et entrent dans la zone d'action du pôle voisin de sens contraire. Le sens de la F.É.M. induite dans la section change. Le processus de passage des sections de

l'enroulement d'une branche parallèle à une autre et les phénomènes connexes sont appelés *commutation*. Pendant un certain temps (période de commutation) dans la section commutée passant par la zone de commutation le courant change de sens. On sait que chaque variation du courant dans un conducteur provoque une variation du champ magnétique, ce qui fait naître dans le conducteur une F.É.M.

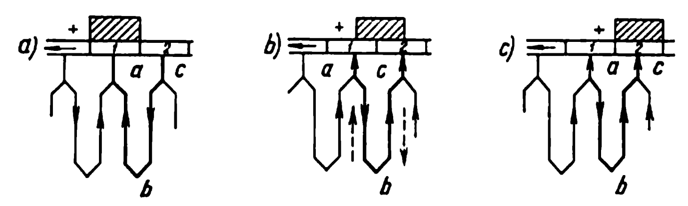


Fig. 278. Commutation du courant dans une section

d'auto-induction. D'après la loi de Lenz, la F.É.M. d'auto-induction tend à retarder la variation du courant dans la section de l'enroulement, ce qui fait retarder le phénomène de commutation.

La valeur de la F.É.M. d'auto-induction dépend de l'inductance de la section commutée et de la vitesse de variation du courant dans cette section.

Etant donné que le processus de commutation est très complexe et ne pouvant pas expliquer ce phénomène plus en détail nous essayerons de le présenter sous une forme simplifiée. La figure 278, *a* représente une section de l'enroulement *abc* qui se trouve dans la zone de commutation. Le courant provenant de deux branches parallèles voisines arrive à la lame *1* de collecteur et, par le balai positif, se dirige vers le circuit extérieur. Pour simplifier les choses, prenons la largeur du balai égale à celle d'une lame de collecteur. Dans la position indiquée sur la figure 278, *b*, la section *abc* s'est déplacée latéralement et le balai a commencé à toucher la lame *2* du collecteur. En comparant les deux positions de la section, on note que le sens du courant dans les conducteurs a changé. Si, auparavant, le courant allait de *c* vers *a*, dans le deuxième cas il va de *a* vers *c*. Le changement de sens du courant dans le conducteur a eu lieu durant le temps où le balai passait d'une lame de collecteur à une autre.

Sur la figure 278, *c* est indiquée la position intermédiaire de la section commutée lorsque le balai passe de la lame *1* à la lame *2*.

Au moment où le balai couvrait de la même façon les lames *1* et *2*, la section *abc* de l'enroulement se trouvait sur la ligne neutre magnétique. Si le processus de commutation n'était pas accompagné d'autres phénomènes complexes, le courant dans la section de l'enroulement serait nul. Dans ce cas, dans les conducteurs de jonction *a* et *c* circuleraient des courants inversement proportionnels aux résistances de contact entre les balais et les lames de collecteur ou, autrement dit, proportionnels aux surfaces de contact du balai avec les lames de collecteur. Dans la position où une moitié du balai touche la lame *1* et l'autre moitié touche la lame *2*, les conducteurs de jonction *a* et *c* sont traversés par des courants égaux dont la somme est égale au courant partant du balai positif vers le réseau. Au fur et à mesure que le balai quitte la lame *1* et couvre la lame *2*, la surface de contact du balai avec la lame *1* diminue et la surface de contact avec la lame *2* augmente. Cela provoque une diminution correspondante du courant dans le conducteur *a* et un accroissement du courant dans le conducteur *c*. Le courant dans la section de l'enroulement augmente. En réalité, le phénomène de commutation est bien plus complexe à cause de l'apparition dans la section de l'enroulement d'une F.É.M. d'auto-induction qui d'après la loi de Lenz crée un courant qui dans le cas considéré est opposé au courant circulant dans les conducteurs de la section. Sur la figure 278, *b* le sens du courant engendré par la F.É.M. d'auto-induction est indiqué par des flèches en pointillé. On voit sur cette figure que dans le conducteur *a* les courants vont dans le même sens et dans le conducteur *c* en sens contraire. Cela fait augmenter la densité du courant sous le bord de sortie du balai et fait diminuer la densité du courant sous le bord d'entrée du balai. L'accroissement de la densité du courant dans le balai provoque son échauffement excessif et la formation d'étincelles au collecteur qui peuvent endommager ce dernier.

Les étincelles aux balais peuvent être également provoquées par d'autres causes, par exemple, par un mauvais état de la surface du collecteur, l'encrassement du collecteur et des balais, les vibrations de la machine, une grande

différence du potentiel entre les lames voisines du collecteur, une surcharge de la dynamo.

Le sens du courant dans une section d'enroulement qui s'approche de la zone de commutation correspond au sens de la F.É.M. induite dans la branche parallèle d'où sort cette section. Pour une bonne commutation il faut que le courant soit nul dans la section arrivée sur la ligne neutre magnétique et court-circuitée par le balai. Mais la F.É.M. d'auto-induction prenant naissance dans la section et qui d'après la loi de Lenz est dirigée dans le même sens que la F.É.M. dans les conducteurs, s'oppose à la variation du courant et tend à conserver l'intensité et le sens précédent du courant. On comprend donc la tendance que l'on a de faire cesser l'action de la F.É.M. d'auto-induction. A cet effet, on décale les balais de la dynamo à partir de la ligne neutre magnétique d'un certain angle dans le sens de rotation de l'induit. Dans la section commutée pénétrant dans le champ magnétique d'une autre polarité est alors induite une F.É.M. dont le sens est opposé à celui de la F.É.M. d'auto-induction. Etant donné que la valeur de la F.É.M. d'auto-induction dépend de l'intensité du courant dans les conducteurs de l'enroulement, c'est-à-dire de la charge de la dynamo, il se fait que pour des charges différentes dans la section commutée apparaîtront des F.É.M. d'auto-induction de valeurs différentes.

Pour assurer une compensation constante de la F.É.M. d'auto-induction, on devrait pouvoir changer continuellement la position des balais, ce qui est pratiquement impossible. Pour cette raison, les machines à courant continu modernes comportent des pôles auxiliaires disposés entre les pôles principaux. Les balais dans ce cas sont calés suivant la ligne neutre théorique. Le champ magnétique créé par les pôles auxiliaires induit dans les conducteurs passant par la zone de commutation une F.É.M. opposée à la F.É.M. d'auto-induction, ce qui assure une bonne commutation et prévient l'apparition des étincelles aux balais.

Pour pouvoir compenser la F.É.M. d'auto-induction qui varie avec la charge, il faut que le champ magnétique des pôles auxiliaires varie proportionnellement à la charge de la dynamo. A cet effet, l'enroulement des pôles auxiliaires est connecté en série avec l'enroulement d'induit.

La figure 279 montre la disposition et le branchement de l'enroulement des pôles auxiliaires. On voit sur cette

figure qu'en arrière du pôle principal (dans le sens de rotation de l'induit) se trouve un pôle auxiliaire de nom contraire. Le champ magnétique des pôles auxiliaires a un sens opposé à celui du champ d'induit de sorte qu'il l'équilibre.

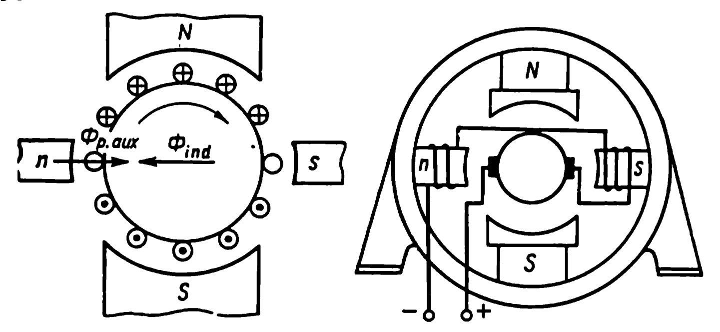


Fig. 279. Pôles auxiliaires et leur branchement

Les dynamos dont la charge varie brusquement (monte-charge, ponts roulants, laminoirs) sont parfois dotées d'un enroulement de compensation placé dans des encoches spécialement ménagées dans les pièces polaires. Le sens du

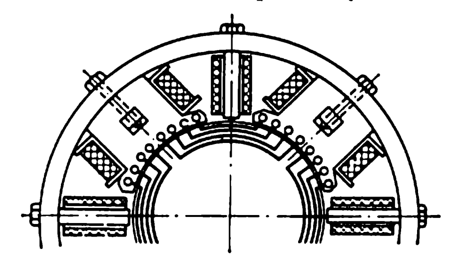


Fig. 280. Schéma d'un enroulement de compensation

courant dans l'enroulement compensateur doit être opposé à celui du courant dans les conducteurs de l'enroulement d'induit. Sur l'arc embrassé par la pièce polaire, le champ magnétique de l'enroulement de compensation équilibre le champ de réaction d'induit en prévenant la déformation du champ de la machine. L'enroulement de compensation, tout comme l'enroulement des pôles auxiliaires, est branché en série avec l'enroulement d'induit. La figure 280 montre le schéma d'un enroulement de compensation.

§ 137. TYPES DE DYNAMOS

Selon le mode de création du champ magnétique, les dynamos à courant continu se divisent en trois groupes:

1) dynamos à aimants permanents ou magnéto-électriques;

2) dynamos à excitation indépendante ou séparée;

3) dynamos à auto-excitation ou auto-excitatrices.

Les dynamos magnéto-électriques se composent d'un ou de plusieurs aimants permanents dans le champ desquels tourne l'induit avec son enroulement. Etant donné la faible puissance qu'elles produisent, les dynamos de ce type ne sont pas utilisées dans l'industrie.

Dans une dynamo à excitation indépendante les enroulements des pôles sont alimentés par une source de tension continue (génératrice à courant continu, redresseur, etc.) qui ne dépend pas de la dynamo.

L'alimentation de l'enroulement d'excitation des pôles d'une dynamo à auto-excitation est réalisée depuis balais de l'induit de la machine elle-même. Le principe d'auto-excitation est le suivant. En absence de courant dans l'enroulement d'excitation, l'induit de la machine tourne dans un faible champ magnétique dû au magnétisme rémanent des pôles. La F.É.M. minime induite à ce moment dans l'enroulement d'induit fournit un faible courant à l'enroulement des pôles. Le champ magnétique des pôles augmente, ce qui fait augmenter la F.É.M. dans les conducteurs de l'induit. A son tour, cela provoque un accroissement du courant d'excitation. Cela continue jusqu'à l'établissement dans l'enroulement d'excitation d'un courant correspondant à la valeur de la résistance du circuit d'excitation. L'auto-excitation de la machine peut avoir lieu seulement dans le cas où le courant circulant dans l'enroulement des pôles crée un champ magnétique qui renforce le champ dû au magnétisme rémanent et si, en plus, la résistance du circuit d'excitation ne dépasse pas une certaine valeur déterminée.

Suivant le mode de connexion de l'enroulement d'excitation à l'enroulement d'induit, les dynamos à auto-excitation se classent en trois types:

1. Dynamos à excitation en dérivation ou « shunt », dans lesquelles l'enroulement d'excitation des pôles est connecté en parallèle avec l'enroulement d'induit.

2. Dynamos à excitation série dans lesquelles l'enroulement d'excitation des pôles est connecté en série avec l'enroulement d'induit.

3. Dynamos à excitation composée ou compound, dans lesquelles les pôles comportent deux enroulements: l'un est branché en parallèle et l'autre en série avec l'enroulement d'induit.

Selon le mode de connexion de l'enroulement d'excitation avec l'enroulement d'induit, la dynamo possède ses particularités et ses caractéristiques propres.

§ 138. DYNAMO À EXCITATION INDÉPENDANTE

Le schéma d'une dynamo à excitation indépendante ou séparée est représenté par la figure 281. Le courant d'excitation venant d'une source de tension extérieure ne dépend

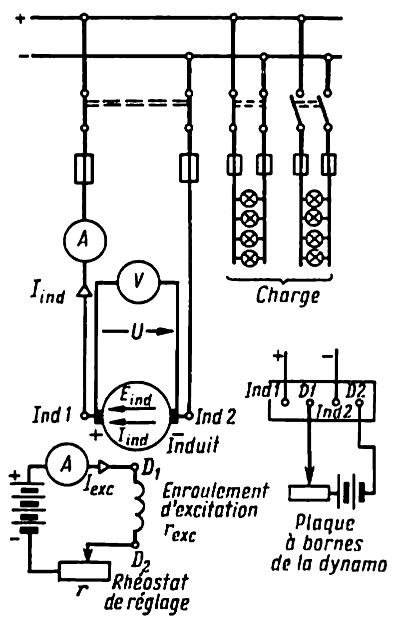


Fig. 281. Schéma d'une dynamo à excitation indépendante

pas des conditions de fonctionnement de la dynamo. Un rhéostat inséré dans le circuit d'excitation permet de faire varier l'intensité du courant d'excitation, ce qui provoque

une variation du champ magnétique de la machine, ce qui à son tour fait varier la F.É.M. ou la tension de la génératrice. Ce rhéostat est souvent appelé *rhéostat de réglage*. Il comporte un troisième plot complémentaire permettant de court-circuiter l'enroulement d'excitation en cas de sa mise hors circuit. Cela empêche la fusion des derniers plots du rhéostat, car lors du débranchement d'un circuit à grande inductance, le courant qui disparaît rapidement provoque une F.É.M. d'auto-induction maintenant l'arc entre le levier et le dernier plot du rhéostat.

L'enroulement d'excitation comporte un grand nombre de spires en fil de cuivre isolé. Lorsque l'induit tourne à

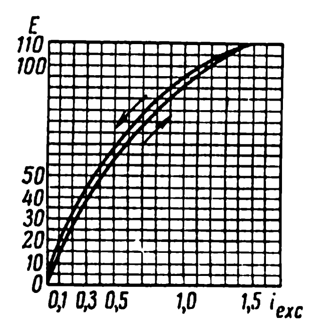


Fig. 282. Caractéristique à vide d'une dynamo à excitation indépendante

une vitesse constante et la machine n'est pas chargée (marche à vide), sa F.É.M. ne dépend que de l'intensité du courant d'excitation. En faisant varier à l'aide du rhéostat de réglage la résistance du circuit d'excitation et en notant les indications de l'ampèremètre monté dans le circuit d'excitation et du voltmètre connecté aux balais de la dynamo, on peut établir la relation entre la F.É.M. de la dynamo en marche à vide et le courant d'excitation. Cette relation est représentée par une courbe appelée *caractéristique à vide* (fig. 282).

Lors de la première aimantation de la dynamo et en l'absence de courant d'excitation ($I_{exc} = 0$), le voltmètre de la machine reste au zéro pour toute vitesse de l'induit. L'accroissement du courant d'excitation est accompagné d'abord d'un accroissement proportionnel de la F.É.M. de la machine. La partie correspondante de la caractéris-

tique à vide est rectiligne. Mais ensuite, l'accroissement ultérieur du courant d'excitation provoque la saturation de la machine et la courbe s'incline. Si on diminue maintenant le courant d'excitation de la dynamo, on remarque que pour les mêmes valeurs du courant d'excitation la F.É.M. de la dynamo a des valeurs plus grandes que lors de l'aimantation, et la courbe de désaimantation passe un peu plus haut que la courbe d'aimantation. Ce fait est dû au phénomène d'hystérésis. Lorsque le courant d'excitation diminue jusqu'à zéro, la dynamo fournit une certaine F.É.M. due au magnétisme rémanent. Plus le point correspondant à la F.É.M. de la dynamo lors du fonctionnement normal se trouve au-delà du coude de la caractéristique, moins la F.É.M. de la machine varie en fonction du courant d'excitation. La possibilité de régler la tension, lorsque la machine fonctionne au-delà du coude, est bien faible. Au contraire, lorsque la dynamo fonctionne sur la partie rectiligne de la caractéristique, de faibles variations du courant d'excitation provoquent de fortes variations de la F.É.M. de la dynamo. La caractéristique à vide montre donc les propriétés magnétiques de la machine.

La condition principale à laquelle doit répondre une machine génératrice est la constance de la tension aux différentes charges. Mais puisque la tension d'une dynamo alimentant un réseau extérieur varie avec la charge, la meilleure machine est celle dont la tension varie le moins pour des variations identiques de la charge .

La variation avec la charge de la tension d'une dynamo à excitation indépendante est due à deux causes :

1. Chute de tension dans l'enroulement d'induit et dans le contact entre le balai et le collecteur.

La F.É.M. d'une dynamo (E) diffère de la tension aux balais (U) de la valeur de chute de tension dans l'enroulement d'induit $I_{ind}r_{ind}$:

$$E = U + I_{ind}r_{ind} \text{ ou } U = E - I_{ind}r_{ind}.$$

Si, par exemple, la F.É.M. d'une dynamo est de 120 V et la résistance de l'enroulement d'induit est de 0,01 ohm, la tension de la machine pour un courant de 50 A est :

$$U = E - I_{ind}r_{ind} = 120 - 50 \cdot 0{,}01 = 119{,}5 \text{ V};$$

pour un courant de 100 A :

$$U = 120 - 100 \cdot 0{,}01 = 119 \text{ V};$$

et, pour un courant de 200 A :

$$U = 120 - 200 \cdot 0{,}01 = 118 \text{ V}.$$

Ces exemples montrent qu'avec l'accroissement de la charge la tension de la dynamo baisse. Pour diminuer la chute de tension dans la résistance r_{ind} l'enroulement d'induit des machines à courant continu est fait en fil de cuivre et en barres de grande section. La résistance de

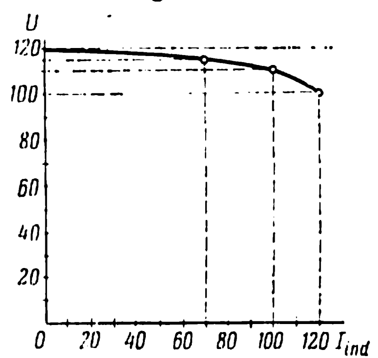


Fig. 283. Caractéristique externe d'une dynamo à excitation indépendante

l'enroulement d'induit est alors très faible, de l'ordre de quelques dixièmes, centièmes ou même millièmes d'ohm.

En marche à vide, $I_{\text{ind}} = 0$ et, pour cette raison,

$$U = E.$$

2. La deuxième cause qui produit une diminution de la tension dans les dynamos à excitation indépendante lors de l'accroissement de leur charge est la réaction d'induit qui provoque une diminution du flux magnétique et de la F.É.M. de la machine.

Si on augmente progressivement la charge de la dynamo, en notant l'intensité du courant de charge d'après l'ampèremètre inséré dans le circuit d'induit, la vitesse de la dynamo et le courant d'excitation étant constants, on peut obtenir la relation entre la tension aux bornes de la machine et le courant de charge. Cette relation est appelée *caractéristique externe*. La figure 283 montre la caractéristique externe d'une dynamo à excitation indépendante. Sur l'axe horizontal est porté le courant de charge et sur l'axe

vertical la tension de la dynamo. Cette caractéristique montre comment la tension aux bornes de la dynamo varie avec la charge. Dans les dynamos à excitation indépendante à charge nominale, dont la vitesse et le courant d'excitation sont constants, la baisse de la tension peut constituer 5 à 8 % de la tension nominale. Pour maintenir la tension constante on fait varier le courant d'excitation à l'aide d'un rhéostat de réglage.

La figure 281 montre que dans le circuit de l'induit de la dynamo sont insérés des coupe-circuit qui protègent l'enroulement d'induit lorsqu'un court-circuit a lieu dans le circuit extérieur. Le changement du sens de rotation d'une dynamo à excitation indépendante provoque le changement de la polarité des balais.

§ 139. DYNAMO À EXCITATION EN DÉRIVATION

La figure 284 représente le schéma d'une dynamo à excitation en dérivation ou « shunt ». L'enroulement d'excitation des pôles est branché parallèlement à l'enroulement d'induit. Pendant le fonctionnement de la dynamo, le courant traversant l'enroulement d'induit I_{ind} et venant du balai positif passe par deux branches parallèles: le circuit extérieur et l'enroulement d'excitation. La somme du courant de réseau I et du courant d'excitation I_{exc} arrivant au balai négatif est égale au courant d'induit. On peut donc écrire:

$$I_{ind} = I + I_{exc}.$$

La puissance utile de la dynamo est caractérisée par l'intensité du courant fourni au réseau. Le courant d'excitation doit donc être aussi petit que possible. Généralement, le courant d'excitation des dynamos excitées en dérivation est égal à 2,5 % du courant nominal passant par l'induit. Pour créer la force magnétisante nécessaire, l'enroulement d'excitation comporte un grand nombre de spires en fil de cuivre fin isolé.

Si lors de la marche à vide de la dynamo on fait varier le courant d'excitation à l'aide du rhéostat de réglage, l'induit tournant à vitesse constante, la F.É.M. de la dynamo varie également. La variation de la F.É.M. en fonction du courant d'excitation de la machine est appelée caractéristique à vide. Pour une dynamo à excitation en dériva-

tion, cette caractéristique est analogue à celle d'une dynamo à excitation indépendante fonctionnant à vide.

Lorsqu'une dynamo à excitation en dérivation est chargée, sa tension varie en fonction du courant de charge.

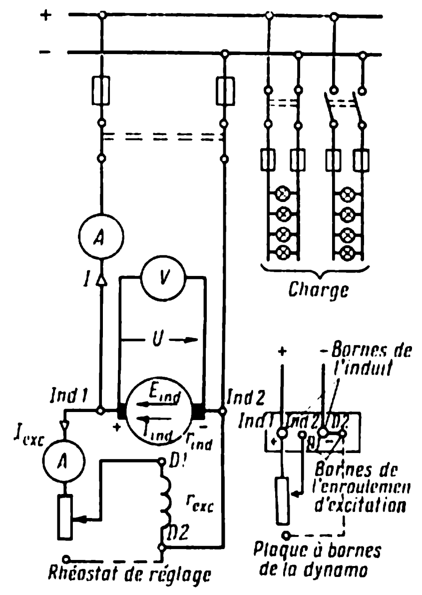


Fig. 284. Schéma d'une dynamo à excitation en dérivation

Dans une telle dynamo la tension varie avec la charge pour trois raisons suivantes:

1) par suite de la chute de tension dans l'enroulement d'induit et dans le contact balai-collecteur;

2) par suite de la diminution du flux magnétique provoquée par la réaction d'induit;

3) sous l'effet des deux premières causes la tension de la dynamo (ou la tension aux balais de l'induit) diminue avec la charge. Le courant d'excitation, la résistance du circuit d'excitation étant constante, est proportionnel à la tension aux balais de l'induit. Pour cette raison, avec la diminution de la tension aux balais, le courant d'excitation diminue également, ce qui provoque une diminution du flux magnétique des pôles, ce qui provoque à son tour une diminution complémentaire de la F.É.M. et de la tension aux bornes de la dynamo.

Ce phénomène ne se produit pas dans les dynamos à excitation indépendante, parce que leur enroulement d'excitation est alimenté par une source indépendante à tension constante.

Si, à vitesse de rotation de l'induit et à résistance du circuit d'excitation constantes, on fait varier la résistance du circuit extérieur, le courant dans le réseau varie également. En notant l'intensité du courant dans le réseau

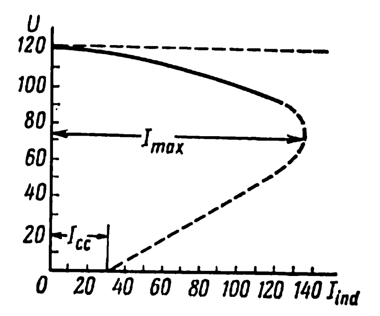


Fig. 285. Caractéristique externe d'une dynamo à excitation en dérivation

d'après un ampèremètre branché dans le circuit d'induit et en déterminant la tension de la dynamo d'après un voltmètre branché aux bornes de la machine, on peut relever la relation entre le courant de charge et la tension de la dynamo. Nous savons que cette relation est appelée caractéristique externe. La caractéristique externe d'une dynamo à excitation en dérivation est indiquée sur la figure 285. Elle montre qu'avec l'accroissement de la charge la tension de la dynamo tombe. Dans les limites du fonctionnement normal, la diminution de la tension des dynamos de ce type est faible (partie continue de la caractéristique). Pour les dynamos à pôles auxiliaires, à charge nominale de la machine, elle est de 8 à 15 %. En fonctionnement la variation de la tension est éliminée, en faisant varier la résistance du circuit d'excitation à l'aide d'un rhéostat. L'accroissement ultérieur du courant de charge est accompagné d'une forte diminution de la tension (partie en pointillé de la caractéristique). Pour une certaine valeur de la résistance du circuit extérieur le courant de charge atteint sa valeur maximale critique I_{max} après laquelle il commence à diminuer même lorsque la résistance du circuit extérieur

diminue. L'explication est donnée par le fait que l'intensité du courant du réseau dépend non seulement de la valeur de la résistance du réseau mais aussi de la tension de la dynamo. Dès que le courant du réseau atteint sa valeur critique I_{max}, les facteurs indiqués qui provoquent la diminution de la tension deviennent prédominants et bien que la résistance du réseau diminue le courant dans ce dernier diminue également.

En cas d'un court-circuit la tension de la dynamo devient nulle et la F.É.M. induite dans l'enroulement d'induit par le magnétisme résiduel des pôles crée dans le circuit un courant de court-circuit. Il arrive parfois qu'une dynamo excitée en dérivation, mise en marche pour la première fois, ne fournit pas de tension. Cela peut arriver parce que les noyaux des pôles sont sans magnétisme rémanent ou ils le possèdent, mais une connexion erronée de l'enroulement d'excitation fait que le courant dans l'enroulement crée un flux magnétique d'excitation opposé au flux du magnétisme rémanent, de sorte que les pôles sont désaimantés. Dans ce cas, il convient de déconnecter les extrémités de l'enroulement d'excitation et de les relier pour un certain temps à une source de tension continue (par exemple, à une batterie d'accumulateurs). Cela est suffisant pour transmettre aux pôles un magnétisme rémanent, de sorte que la dynamo peut créer une faible F.É.M. lors du fonctionnement avec l'enroulement de pôles débranché. Si une dynamo est mise en marche pour la première fois et on n'est pas sûr que les connexions de l'enroulement d'excitation sont correctes, il convient, après avoir mis en marche la machine, de toucher avec les bouts de l'enroulement d'excitation les sorties de l'induit sur la plaque à bornes (en observant, bien sûr, toutes les règles de sécurité) et de surveiller le voltmètre de la dynamo. Si les indications du voltmètre augmentent cela prouve que l'enroulement d'excitation est connecté correctement. Mais si elles diminuent, il faut intervertir les fils de l'enroulement d'excitation. Après avoir vérifié le branchement de l'enroulement d'excitation on arrête la dynamo et on fixe solidement les fils de l'enroulement d'excitation sur la plaque à bornes de la machine. Le changement du sens de rotation de la dynamo à excitation en dérivation provoque le changement du sens de la F.É.M. induite dans l'enroulement d'induit, le changement de la polarité des balais et le changement

du sens du courant dans l'enroulement d'excitation, ce qui provoque la désaimantation des pôles. C'est pour cette raison que sur les dynamos à excitation en dérivation on indique le sens de rotation de l'induit.

§ 140. DYNAMO À EXCITATION SÉRIE

La figure 286 représente le schéma d'une dynamo à excitation série. Etant donné que l'enroulement d'excitation de cette dynamo est branché en série avec l'enroulement d'induit les deux enroulements sont parcourus, pour $a = 1$, par le même courant. Pour cette raison l'enroulement

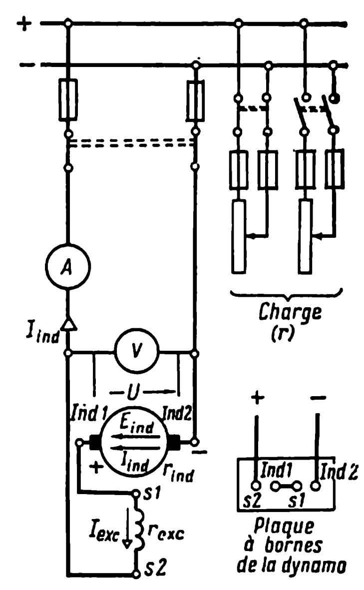


Fig. 286. Schéma d'une dynamo à excitation en série

d'excitation des machines de moyenne et de grande puissance comporte, à la différence des machines excitées en dérivation, un petit nombre de spires en fil de forte section. Lorsque le circuit extérieur est ouvert il est impossible d'exciter une telle dynamo. Il est donc impossible de relever sa caractéristique à vide par la méthode classique. Lorsque le circuit extérieur est fermé, l'enroulement d'induit, ainsi que l'enroulement d'excitation, est parcouru par le courant

de charge. Avec l'accroissement de la charge de la dynamo le flux magnétique des pôles augmente, ce qui fait croître la F.É.M. et la tension de la machine. Pour cette raison, la caractéristique externe d'une telle dynamo a la forme indiquée sur la figure 287 (partie continue de la courbe caractéristique). On voit donc qu'une dynamo excitée en série diffère par ses propriétés d'une dynamo excitée en dérivation, puisque dans la première la tension augmente avec

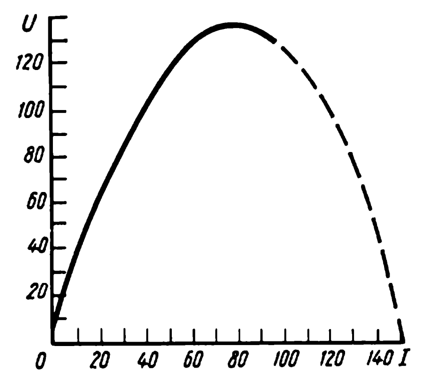


Fig. 287. Caractéristique externe d'une dynamo à excitation en série

l'accroissement de la charge, tandis que dans la seconde elle diminue. Avec l'accroissement du courant de charge le circuit magnétique devient saturé, la F.É.M. de la dynamo n'augmente presque pas et la tension aux bornes de la machine commence à diminuer. Cela est dû à l'accroissement de la réaction d'induit et à la chute de tension dans les enroulements de la dynamo (partie en pointillé de la courbe caractéristique de la fig. 287). En cas d'un court-circuit entre les bornes de l'induit, le courant sera très intense mais la tension sera nulle. La caractéristique externe d'une dynamo excitée en série montre qu'avec l'accroissement du courant de charge la tension de la machine augmente brusquement. C'est la raison pour laquelle les dynamos de ce type sont employées rarement.

§ 141. DYNAMO À EXCITATION COMPOSÉE

Le schéma d'une dynamo à excitation composée ou « compound » est représenté sur la figure 288. Cette dynamo, qui comporte deux enroulements sur ses pôles principaux

(fig. 289), combine les propriétés d'une dynamo excitée en dérivation et celles d'une dynamo excitée en série. La caractéristique à vide de cette machine ressemble à la

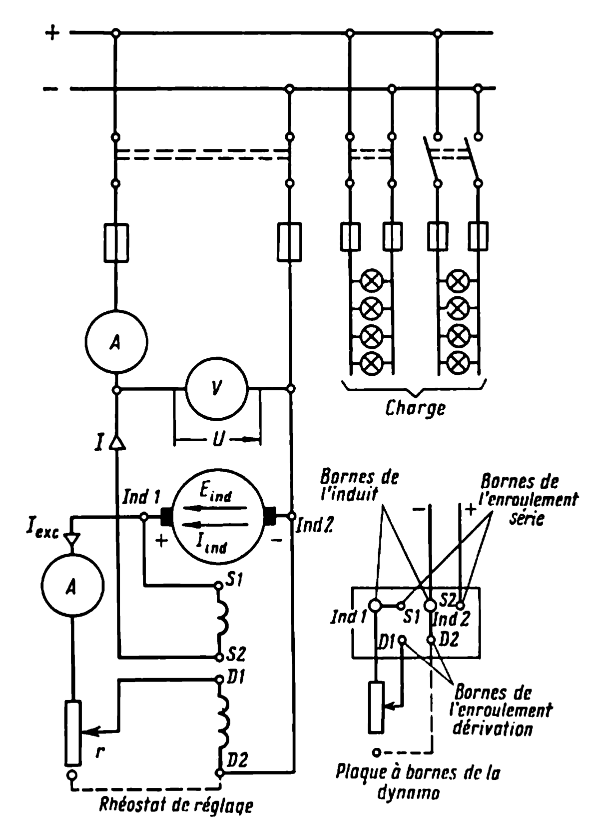


Fig. 288. Schéma d'une dynamo à excitation composée

caractéristique à vide d'une dynamo dérivation, puisqu'en marche à vide l'enroulement série ne fonctionne pas. Puisque dans une dynamo à excitation en dérivation la tension diminue avec la charge et dans une dynamo à excitation en série elle augmente avec la charge, on peut obtenir, en choisissant convenablement le nombre de spires des enroulements dérivation et série d'une machine à excitation composée, une faible variation de la tension avec la charge.

Il semblerait alors qu'on a enfin une dynamo pouvant fournir une tension constante.

Or, avec la variation du courant de charge la chute de tension dans les fils allant de la machine vers le récepteur varie également. Pour cette raison, même lorsque la tension fournie par la dynamo est constante, la tension aux bornes des récepteurs varie. Pour éviter cela, le nombre de spires

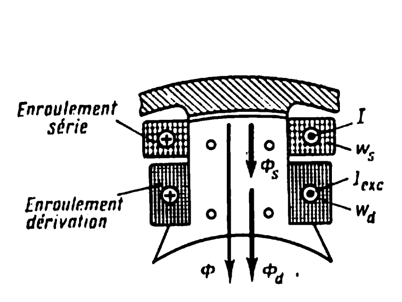


Fig. 289. Pôle principal d'une machine à excitation composée

Fig. 290. Caractéristique externe d'une dynamo à excitation composée

de l'enroulement série d'une telle machine est choisi de façon que le champ magnétique créé par cet enroulement puisse non seulement compenser la chute de tension provoquée par la réaction d'induit et la chute de tension dans les enroulements de la machine, mais qu'il soit même un peu supérieur. Dans ce cas la tension de la dynamo augmente un peu avec la charge, ce qui permet de compenser la chute de tension dans les fils d'alimentation, de sorte que la tension aux bornes des récepteurs est presque constante. La caractéristique externe d'une dynamo à excitation composée est représentée par la figure 290.

§ 142. COUPLAGE EN PARALLÈLE DES DYNAMOS À EXCITATION EN DÉRIVATION

Pour le fonctionnement des dynamos couplées en parallèle il faut assurer les conditions suivantes.

1. La tension de la dynamo à coupler doit être égale à la tension du réseau ou à la tension de la dynamo en marche.

2. La polarité des bornes de la machine à coupler et celle du réseau doivent être les mêmes (le « + » de la dynamo doit être connecté au « + » du réseau et le « —» de la dynamo au « — » du réseau).

La première condition de la marche en parallèle des dynamos, c'est-à-dire l'égalité des tensions, est assurée de façon suivante. On met en marche le moteur primaire qui entraîne la dynamo à coupler et on amène sa vitesse à la valeur nominale. En faisant varier la résistance du rhéostat de réglage de la dynamo on règle la tension de cette dernière de façon qu'elle soit égale à celle du réseau ou à celle de la dynamo en service. On vérifie l'égalité des tensions à l'aide de voltmètres branchés sur le réseau et sur la dynamo ou d'un seul voltmètre doté d'un commutateur.

La seconde condition de la marche en parallèle, c'est-à-dire la coïncidence des polarités, n'est vérifiée que pour les dynamos qui sont couplées pour la première fois en vue de leur marche en parallèle. Les bornes de la dynamo sont disposées de façon que cette condition soit assurée préalablement lors des branchements ultérieurs. On peut vérifier la polarité soit à l'aide d'un voltmètre magnétoélectrique, soit à l'aide de lampes à incandescence. On prend deux bornes quelconques du réseau et de la dynamo et on les réunit par une barrette, l'interrupteur de la machine étant ouvert. Aux deux autres bornes on branche un voltmètre prévu pour une double tension du réseau. Si le « + » du réseau coïncide avec le « + » de la dynamo et le « — » du réseau avec le « — » de la dynamo, le voltmètre reste au zéro. En cas d'un branchement incorrect, le voltmètre indique une tension double.

La figure 291 représente le schéma des connexions pour la marche en parallèle de deux dynamos excitées en dérivation. La dynamo branchée parallèlement sur le réseau ou sur une autre dynamo en service ne débite pas de courant parce que sa F.É.M. est égale et opposée à la tension du réseau. Pour qu'elle fournisse du courant au réseau, il faut augmenter sa F.É.M. à l'aide d'un rhéostat de réglage.

Le courant que la dynamo fournit au réseau passe par l'enroulement d'induit et par son interaction avec le flux magnétique des pôles crée un couple résistant opposé au couple développé par le moteur primaire entraînant la dynamo. Avec l'accroissement du courant de charge la

puissance mécanique du moteur primaire doit donc augmenter également.

Pour faire passer la charge d'une dynamo à une autre il faut faire varier simultanément la résistance des rhéostats de réglage en augmentant le courant d'excitation

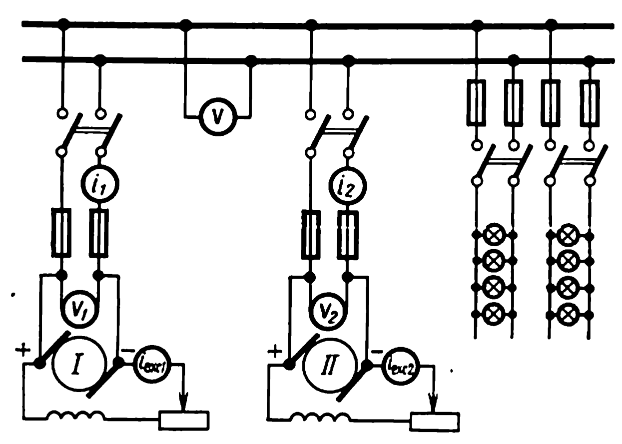


Fig. 291. Couplage en parallèle de deux dynamos à excitation en dérivation

de la dynamo dont la charge doit être augmentée et en diminuant le courant d'excitation de la dynamo dont la charge doit être diminuée.

Il peut arriver que pendant la marche d'une dynamo sa F.É.M. diminue (par exemple, en cas de la diminution de la vitesse du moteur primaire ou de la rupture de la courroie de transmission entre ce dernier et la dynamo). Dans ce cas, le courant du réseau sera dirigé vers la dynamo qui se mettra à fonctionner alors en moteur. Pour empêcher ce phénomène de se produire on monte dans le circuit de la dynamo des disjoncteurs spéciaux qui la mettent hors circuit dès que son courant change de sens.

§ 143. FONCTIONNEMENT D'UNE MACHINE À COURANT CONTINU EN MOTEUR

Lorsqu'une machine à courant continu est branchée sur une source de tension, elle fonctionnera en moteur, c'est-à-dire qu'elle transformera l'énergie électrique en

énergie mécanique. Cette propriété des machines électriques de fonctionner soit en génératrice, soit en moteur est appelée *réversibilité.*

Bien qu'il existe des moteurs à courant alternatif de construction plus simple, les moteurs à courant continu sont largement utilisés. La possibilité de régler la vitesse dans de larges limites, qui forme l'avantage principal de ces moteurs, permet de les utiliser dans les véhicules mus par électricité, dans les mécanismes de levage, dans de différents montages de réglage et de commande automatique, etc.

Pour les tramways on utilise des moteurs de 33 à 54,5 kW ; 550 V ; 560 à 660 tr/mn. Pour les locomotives électriques on utilise des moteurs de 320 à 450 kW ; 750 V et 1500 V. Les moteurs destinés aux ponts roulants sont de 3 à 100 kW. Pour l'entraînement des laminoirs on utilise des moteurs à courant continu de plusieurs milliers de kW.

L'organisation des moteurs électriques est la même que celle des dynamos. Le principe de fonctionnement des moteurs à courant continu repose sur l'interaction du courant de l'enroulement d'induit et le champ magnétique créé par les pôles des électro-aimants. On peut donc écrire pour le couple d'un moteur :

$$C_m = cI_{ind}\Phi,$$

où c est un coefficient de proportionnalité qui tient compte des grandeurs constantes du moteur donné : nombre de paires de pôles, nombre de conducteurs de l'enroulement d'induit, nombre de branches parallèles de l'enroulement d'induit ;

I_{ind} est le courant d'induit ;

Φ est le flux magnétique.

Pour une vitesse de rotation constante, le couple développé par le moteur est égal au couple résistant de la charge mécanique appliquée à l'arbre du moteur :

$$C_m = C_{rés}.$$

La puissance que le moteur demande au réseau est supérieure à la puissance qu'il développe sur son arbre. Cette perte de puissance est due aux pertes par frottement dans les paliers, par frottement des balais contre le collecteur, par frottement de l'induit contre l'air, aux pertes dans le fer par hystérésis et par courants de Foucault et aux pertes par échauffement des enroulements du moteur et des rhéostats. Le rendement d'un moteur électrique varie avec sa charge. Pour une puissance nominale, le rendement des

moteurs varie entre 70 et 93 % en fonction de la puissance, de la vitesse de rotation et du type du moteur.

On peut inverser le sens de rotation d'un moteur en faisant changer le sens du courant soit dans l'enroulement d'induit, soit dans l'enroulement des pôles. Un moteur dans lequel on change simultanément le sens du courant dans l'enroulement d'induit et dans l'enroulement des pôles tournera dans le même sens que précédemment. Selon le mode de connexion de l'enroulement d'induit et de l'enroulement d'excitation, les moteurs électriques à courant continu se classent en moteurs à excitation en dérivation (shunt), moteurs à excitation en série et moteurs à excitation composée (compound).

§ 144. RÔLE DU COLLECTEUR DANS LES MOTEURS À COURANT CONTINU

Les conducteurs de l'enroulement d'induit parcouru par un courant et se trouvant dans le champ magnétique créé par les pôles sont soumis à une force qui tend à les repousser du champ magnétique. Pour que l'induit d'un moteur tourne dans un sens déterminé, il faut que le sens du courant dans le conducteur change aussitôt que le conducteur quitte la zone d'action d'un pôle, traverse la ligne neutre et pénètre dans la zone d'action du pôle voisin de nom contraire. Pour faire changer le sens du courant dans les conducteurs de l'enroulement d'induit du moteur à l'instant où ils passent par la ligne neutre on utilise le collecteur. La destination du collecteur est expliquée sur la figure 292. Un conducteur roulé en spire est placé dans un champ magnétique. Les extrémités de la spire sont soudées aux lames *a* et *b* du collecteur auxquelles sont appliqués les balais de telle sorte qu'au balai gauche est réuni le pôle « + » du réseau et au balai droit le pôle « — ». Dans la position *I* le courant du réseau arrive à la lame *a* du collecteur, passe ensuite par le conducteur supérieur *1* de la spire étant dirigé de l'avant à l'arrière de la feuille, puis revient par le conducteur inférieur *2* de la spire en venant de l'arrière à l'avant (la connexion arrière du cadre n'est pas indiquée sur le schéma), arrive à la lame *b* du collecteur et, par le balai, va au réseau. En utilisant la règle de la main gauche, on détermine que la spire tend à tourner en sens inverse des aiguilles d'une montre. Dans la posi-

tion *II* la spire se trouve sur la ligne neutre. Les lames du collecteur ne touchent pas les balais et, pour cette raison, le courant ne circule pas dans la spire. La spire traverse par inertie la ligne neutre. De plus, les autres conducteurs de l'induit qui, à l'instant donné, ne se trouvent pas sur la

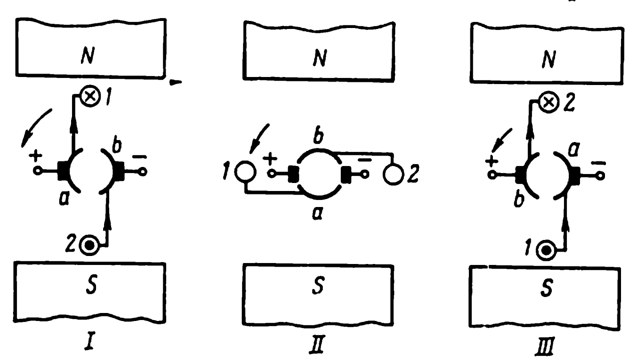


Fig. 292. Collecteur d'un moteur à courant continu

ligne neutre continuent à créer un couple moteur en facilitant le passage de la spire sans courant par la position neutre.

Dans la position *III* le côté de la spire *1* se trouve sous l'autre pôle et le sens du courant dans le conducteur change. La même chose arrive au côté *2* de la spire. Maintenant, sous le balai positif se trouve la lame *b*, tandis que la lame *a* est sous le balai négatif. En utilisant la règle de la main gauche, on constate que le sens de rotation de la spire reste le même, c'est-à-dire que la spire continue à tourner en sens inverse des aiguilles d'une montre.

Ainsi, dès que le conducteur traverse la ligne neutre, la lame du collecteur réunie à ce conducteur quitte le balai d'une polarité et s'approche du balai de polarité opposée.

§ 145. FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE DE L'INDUIT

Lorsque l'induit d'un moteur tourne, son enroulement coupe le champ magnétique. D'après la loi d'induction électromagnétique, une F. É. M. induite prend naissance dans cet enroulement.

Comme on le voit sur la figure 293, le sens de la F.É.M. induite dans le conducteur, déterminé d'après la règle de la

main droite, est opposé à la tension du réseau et, pour cette raison, elle est appelée *F.É.M. inverse* ou *force contre-électromotrice*. Le courant dans l'enroulement d'induit d'un moteur lors du travail de ce dernier est

$$I_{ind} = \frac{U - E}{r_{ind}},$$

où U est la tension du réseau;
E est la force contre-électromotrice;
r_{ind} est la résistance de l'enroulement d'induit du moteur.

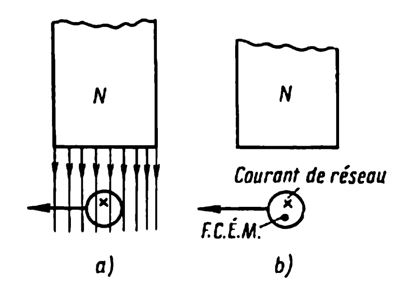


Fig. 293. Apparition d'une force contre-électromotrice

La valeur de la force contre-électromotrice dépend de la vitesse n de rotation du moteur et de la valeur du flux magnétique Φ:

$$E = cn\Phi,$$

où c est un coefficient de proportionnalité qui dépend du nombre de paires de pôles, du nombre de conducteurs et du nombre de branches parallèles de l'enroulement d'induit.

La tension appliquée à l'induit du moteur doit équilibrer la force contre-électromotrice et la chute de tension dans l'enroulement d'induit:

$$U = E + I_{ind} r_{ind}.$$

Mais puisque la résistance de l'enroulement d'induit est petite (quelques dixièmes, centièmes ou même millièmes d'ohm), la chute de tension est également petite. La force contre-électromotrice est donc presque égale à la tension du réseau.

Exemple 1. Déterminer le courant absorbé par un moteur lorsque la tension du réseau est de 120 V, la force contre-électromotrice est de 119,5 V et la résistance de l'enroulement d'induit est de 0,01 ohm.

$$I_{ind} = \frac{U - E}{r_{ind}} = \frac{120 - 119,5}{0,01} = 50 \text{ A}.$$

Au décollage, la vitesse de rotation du moteur est nulle et la force contre-électromotrice est également nulle. Le courant de démarrage est égal, dans ce cas, à la tension du réseau divisée par la résistance d'induit. Le courant d'induit peut alors atteindre une valeur dangereuse pour l'enroulement d'induit et le collecteur.

Pour réduire le courant de démarrage, on branche, pour la durée de démarrage, en série avec l'induit, une résistance qui sert à limiter la pointe du courant de démarrage. Cette résistance se présente sous la forme d'un rhéostat appelé rhéostat de démarrage. Pour la fabrication des résistances utilisées dans les rhéostats de démarrage, on utilise la nickéline (alliage de cuivre, de nickel et de zinc) et le constantan (alliage de cuivre, de nickel et d'aluminium) qui sont caractérisés par une résistivité élevée ($\rho = 0,4$ ou $0,5$). Les résistances sont faites en forme de fil ou de ruban enroulé ou fixé sur un cadre ou sur une carcasse isolante. Pour des rhéostats destinés aux forts courants (moteurs des ponts roulants) on utilise des résistances en zigzag moulées en fonte et placées sur des tiges en acier isolées, réunies par des écrous. Lorsque le courant passe par les résistances d'un rhéostat, celles-ci s'échauffent et dégagent de la chaleur. Les rhéostats sont refroidis par l'air ou par l'huile. Les rhéostats à refroidissement par l'air sont protégés par une enveloppe métallique avec trous, par où l'air chaud peut sortir en laissant sa place à l'air froid. Les résistances des rhéostats à bain d'huile sont plongées dans un bac rempli d'huile dont la conductibilité thermique est plus grande que celle de l'air et, pour cette raison, les rhéostats à bain d'huile sont de dimensions plus réduites que ceux refroidis par l'air.

Au fur et à mesure que la vitesse du moteur augmente, une force contre-électromotrice apparaît dans l'enroulement d'induit et le courant d'induit diminue rapidement. Après cela, la résistance du rhéostat de démarrage devient inutile et même nuisible, car, en réduisant le courant, elle diminue le couple moteur et empêche à la vitesse du moteur d'augmenter rapidement. Pour cette raison, au début du démarra-

ge, la résistance du rhéostat doit être insérée entièrement. Avec l'accroissement de la vitesse de rotation du moteur, il faut réduire progressivement la résistance du rhéostat et à la fin du démarrage sa résistance doit être complètement mise hors circuit. On ne doit pas oublier qu'un rhéostat de démarrage est prévu pour le passage du courant pendant une courte durée (durée du démarrage). Pour cette raison, si à la fin du démarrage le rhéostat n'est pas complètement mis hors circuit, la partie de la résistance restée dans le circuit peut griller.

Pour augmenter plus rapidement la force contre-électromotrice durant le démarrage, il faut veiller à ce que le moteur soit excité complètement, c'est-à-dire que dans le circuit d'excitation aucune résistance ne soit branchée, et surtout ne pas admettre une rupture ou un débranchement de l'enroulement d'excitation. On choisit le rhéostat de démarrage de façon qu'il diminue le courant de démarrage du moteur jusqu'à une valeur égale à 2-2,5 celle du courant nominal. On arrive ainsi à réaliser une économie de matériaux et une diminution du coût du rhéostat et, d'autre part, un courant plus fort lors du démarrage permet au moteur d'atteindre plus rapidement la vitesse de rotation nominale.

Exemple 2. Déterminer la résistance d'un rhéostat de démarrage pour un moteur dont le courant nominal est de 20 A et la résistance de l'enroulement d'induit est de 0,02 ohm, la tension du réseau étant de 220 V.

On choisit un courant de démarrage deux fois supérieur au courant nominal, c'est-à-dire : $20 \times 2 = 40$ A, et on calcule la résistance du circuit d'induit :

$$r = \frac{U}{I_{\text{dém}}} = \frac{220}{40} = 5{,}2 \text{ ohms.}$$

Mais, puisque la résistance de l'enroulement d'induit fait partie du circuit d'induit, la résistance du rhéostat de démarrage est :

$$5{,}2 - 0{,}02 = 5{,}18 \text{ ohms.}$$

L'égalité du couple moteur et du couple résistant qui existe, lorsque la vitesse de rotation de l'induit est constante, est provisoirement perturbée si la charge appliquée à l'arbre du moteur varie. Par exemple, lorsque le couple résistant croît, il devient supérieur au couple moteur et la vitesse du moteur diminue. Cela provoque une diminution de la force contre-électromotrice (qui dépend de la vitesse) et

un accroissement du courant absorbé par le moteur. La diminution de la vitesse continue jusqu'au moment où le courant accru de l'induit crée un nouveau couple moteur, plus élevé, qui devient égal au couple résistant accru. Puis le moteur tournera à une vitesse réduite, mais constante. Au contraire, si la charge du moteur diminue, son couple sera supérieur au couple résistant, l'induit tournera plus rapidement, la force contre-électromotrice augmentera et le courant réduit du moteur créera un couple moteur plus faible.

§ 146. RÉGLAGE DE LA VITESSE DES MOTEURS À COURANT CONTINU

Nous avons constaté plus haut que la valeur de la force contre-électromotrice dépend de la vitesse de rotation et de la valeur du flux magnétique du moteur. Cette relation s'exprime par la formule :

$$E = cn\Phi,$$

d'où

$$n = \frac{E}{c\Phi} = \frac{U - I_{ind} r_{ind}}{c\Phi} .$$

Etant donné que $I_{ind} r_{ind}$ est très petit (par suite de la faible valeur de r_{ind}), on peut écrire approximativement :

$$n = \frac{U}{c\Phi} .$$

Cette expression montre que la vitesse d'un moteur à courant continu est proportionnelle à la tension appliquée et inversement proportionnelle au flux magnétique.

En faisant varier la tension d'alimentation ou le courant d'excitation du moteur à l'aide d'un rhéostat inséré dans le circuit d'excitation on peut régler la vitesse.

§ 147. RÉACTION D'INDUIT DES MOTEURS À COURANT CONTINU

Lors du travail d'un moteur, le champ magnétique de l'induit agit sur le champ des pôles. Dans les moteurs, de même que dans les dynamos, se produit donc une réaction d'induit (fig. 294). Pour le même sens du courant dans

l'enroulement d'induit et pour la même polarité des pôles, le sens de rotation d'un moteur est inverse de celui d'une dynamo. Pour cette raison, la réaction d'induit dans les moteurs est accompagnée des phénomènes suivants.

1. Une désaimantation de la corne de sortie et une aimantation de la corne d'entrée. En cas de saturation du circuit magnétique le flux résultant diminue, ce qui fait augmenter un peu la vitesse du moteur.

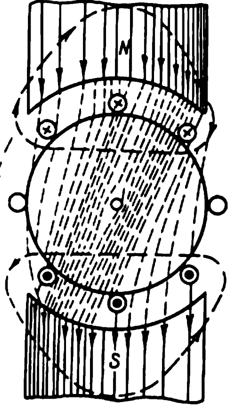


Fig. 294. Réaction d'induit dans les moteurs à courant continu

2. L'axe du champ résultant est décalé par rapport à l'axe des pôles. La ligne neutre magnétique est décalée dans le sens opposé à celui de rotation du moteur d'un angle dont la valeur dépend de la charge du moteur.

3. Les balais montés sur la ligne neutre magnétique doivent également être décalés sur le collecteur dans le sens opposé à celui de rotation du moteur et venir sur une nouvelle ligne neutre.

Lorsqu'une spire de l'enroulement passe par la ligne neutre magnétique, le courant dans la spire, grâce au collecteur, change de sens. En même temps, la spire commutée de l'enroulement d'induit est court-circuitée par les balais. La variation du courant dans la spire provoque une F.É.M. d'auto-induction qui tend à retarder la variation du courant. Comme nous l'avons déjà indiqué plus haut (§ 136), on peut compenser la F.É.M. d'auto-induction par deux méthodes: par le décalage des balais et sans décalage des balais, à l'aide de pôles auxiliaires. Dans une dynamo on doit décaler les balais dans le sens de rotation de l'induit et placer la spire commutée dans le champ d'une autre polarité. La diminution du courant dans la spire de la dynamo, lorsque cette spire s'approche de la zone de commutation, provoque une F.É.M. d'auto-induction qui est dirigée à cet instant dans le sens du courant ou de la F.É.M. induite dans la branche parallèle dont fait partie la spire donnée. Pour compenser la F.É.M. d'auto-induction il faut, à l'aide d'un champ magnétique extérieur, créer dans la spire commutée une F.É.M. dirigée contre la F.É.M. d'auto-

induction (ou contre la F.É.M. induite dans la branche parallèle dont fait partie la spire donnée). Nous avons vu plus haut que le courant qui parcourt l'enroulement d'induit d'un moteur en marche est donné par la formule :

$$I = \frac{U - E}{r_{ind}}.$$

Cette formule montre que le sens du courant dans l'induit est déterminé par la tension du réseau et est opposé à celui de la force contre-électromotrice induite. Dans la spire du moteur qui coupe la ligne neutre magnétique, le courant change de sens. Lorsque le courant dans la spire diminue, la F.É.M. d'auto-induction qui apparaît tend à s'opposer au changement du courant et est dirigée en ce moment dans le sens du courant ou en sens inverse de la force contre-électromotrice. Pour compenser la F.É.M. d'auto-induction il est nécessaire d'induire dans la spire commutée, à l'aide d'un champ magnétique extérieur, une F.É.M. opposée à la F.É.M. d'auto-induction ou opposée au sens du courant et, par conséquent, dirigée dans le même sens que la force contre-électromotrice. Pour améliorer la commutation, on fait donc décaler les balais dans le sens opposé à celui de rotation de l'induit. Pour assurer une commutation sans étincelles et pour empêcher la réaction d'induit, on emploie dans les moteurs à courant continu les mêmes méthodes que dans les dynamos, c'est-à-dire des pôles auxiliaires et un enroulement de compensation. A la différence des dynamos, les pôles principaux et auxiliaires sont disposés dans les moteurs dans l'ordre suivant : derrière le pôle principal du moteur, dans le sens de rotation de l'induit, se trouve un pôle auxiliaire de même polarité.

Les moteurs de grande puissance fonctionnant dans des conditions difficiles, par exemple, les appareils de levage, les moteurs utilisés dans les mines, les moteurs de traction et ceux entraînant les machines-outils et les laminoirs, sont parfois dotés d'un enroulement de compensation.

§ 148. MOTEUR À EXCITATION EN DÉRIVATION

La figure 295 montre le schéma d'un moteur à excitation en dérivation avec un rhéostat de démarrage inséré dans le circuit d'induit. Vu que l'enroulement d'excitation est branché en dérivation sur le réseau d'alimentation,

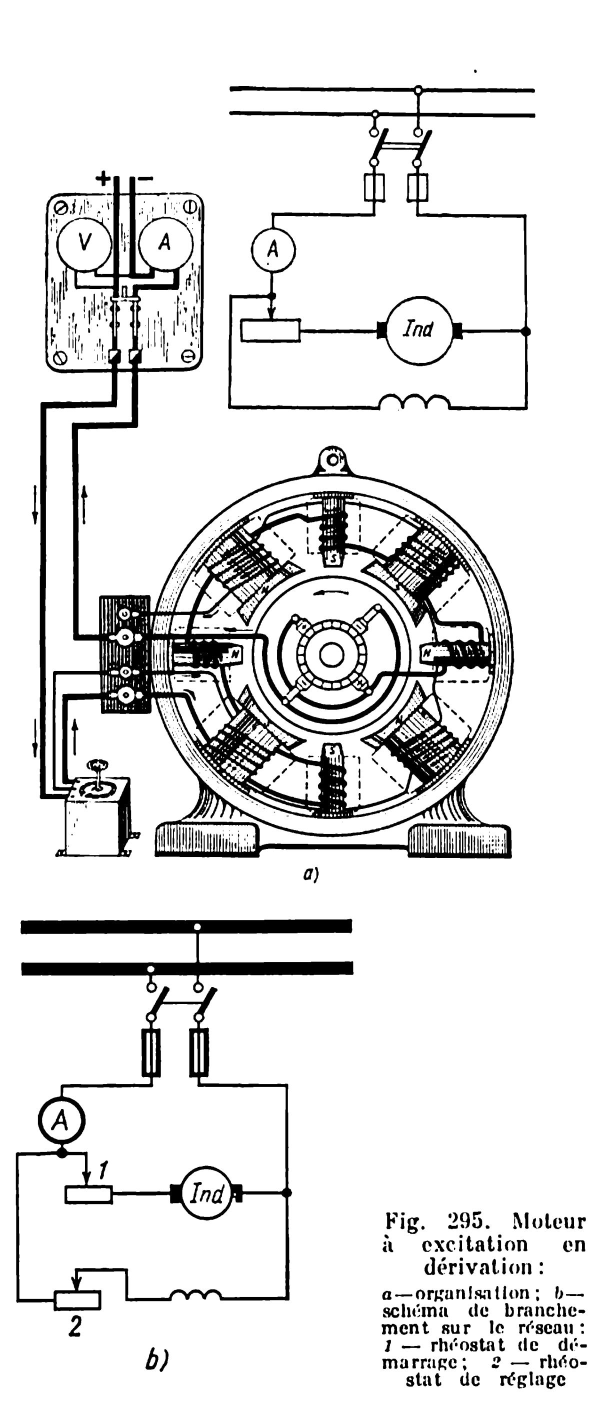


Fig. 295. Moteur à excitation en dérivation :

a — organisation ; *b* — schéma de branchement sur le réseau : *1* — rhéostat de démarrage ; *2* — rhéostat de réglage

la résistance du circuit d'excitation et la tension du réseau étant constantes, le flux magnétique Φ du moteur doit être également constant. Nous avons indiqué plus haut que lorsqu'on néglige la chute de tension dans l'enroulement d'induit, la vitesse d'un moteur à courant continu ne dépend que de la tension du réseau et du flux magnétique. Mais ces dernières grandeurs étant constantes, la vitesse du moteur à excitation en dérivation ne doit pas varier lorsque la charge varie. Cependant, la formule

$$n = \frac{E}{c\Phi} = \frac{U - I_{\text{ind}} r_{\text{ind}}}{c\Phi}$$

montre que la valeur de la force contre-électromotrice du moteur diminue avec l'accroissement du courant d'induit, ce qui fait diminuer la vitesse de la machine. De plus, avec l'accroissement de la charge, la réaction d'induit affaiblit le flux magnétique, ce qui fait augmenter la vitesse. En pratique, on choisit la chute de tension dans l'enroulement d'induit de façon que son influence sur la vitesse du moteur soit presque compensée par la réaction d'induit.

Il en résulte une propriété caractéristique d'un moteur à excitation en dérivation qui fait que sa vitesse reste presque constante lorsque la charge appliquée à son arbre varie. Généralement, la vitesse des moteurs de ce type diminue de 3 à 5 % en pleine charge.

Le couple du moteur est proportionnel au produit du courant d'induit par la valeur du flux magnétique:

$$C_{\text{m}} = cI_{\text{ind}}\Phi.$$

En négligeant la faible variation du flux magnétique par suite de la réaction d'induit, on peut conclure que le couple d'un moteur à excitation en dérivation est proportionnel au courant d'induit:

$$C_{\text{m}} = c_1 I_{\text{ind}}.$$

Un ampèremètre branché dans le circuit d'induit permet donc de juger de la charge du moteur.

Le moteur a une vitesse maximale lors de sa marche à vide si la résistance du rhéostat de réglage est entièrement insérée dans le circuit. La coupure du circuit d'excitation provoque une diminution du flux magnétique jusqu'à la faible valeur du flux rémanent. Puisque la force contre-électromotrice doit être presque égale à la tension du réseau,

la diminution du flux magnétique provoque un brusque accroissement de la vitesse de rotation qui peut devenir dangereux pour le moteur lui-même. Pour cette raison, lors de l'utilisation d'un tel moteur, il faut veiller au bon état du circuit d'excitation.

Le réglage de la vitesse d'un moteur à excitation en dérivation se fait généralement par action sur le flux magnétique à l'aide d'un rhéostat inséré dans le circuit d'excitation. Pour certains moteurs, le réglage de la vitesse se trouve dans les limites de 1 : 3. L'inversion du sens de rotation se fait par changement du sens du courant dans l'enroulement d'excitation des pôles ou par changement du sens du courant dans l'enroulement d'induit. Généralement, le changement du sens de rotation se fait par la seconde méthode, car toute opération avec l'enroulement d'excitation est dangereuse pour le personnel et est indésirable à cause de l'apparition d'une F.É.M. d'auto-induction pouvant provoquer le percement de l'isolation de l'enroulement et la brûlure des contacts.

Les moteurs à excitation en dérivation sont utilisés dans les réseaux à courant continu pour actionner les machines-outils et différents mécanismes (téléphériques, pompes, ventilateurs, machines textiles, laminoirs, machines d'extraction de mines) qui exigent une vitesse de rotation constante ou un réglage de la vitesse dans de larges limites.

§ 149. MOTEUR À EXCITATION SÉRIE

La figure 296 montre le schéma d'un moteur à excitation série. Dans les moteurs de ce type, l'enroulement d'induit et celui d'excitation sont connectés en série. Le courant qui circule dans les deux enroulements du moteur est donc le même.

Etant donné que pour une faible saturation du fer du circuit magnétique le flux est proportionnel au courant d'induit:

$$\Phi = c_1 I_{\text{ind}},$$

le couple moteur

$$C_{\text{m}} = c I_{\text{ind}} \Phi$$

peut être considéré comme étant proportionnel au carré du courant d'induit :

$$C_{\text{m}} = c_2 I_{\text{ind}}^2.$$

Le fait que le couple moteur est proportionnel au carré du courant traversant l'induit permet au moteur à excitation série d'augmenter fortement son couple moteur avec la charge. Ceci présente un grand avantage lors du

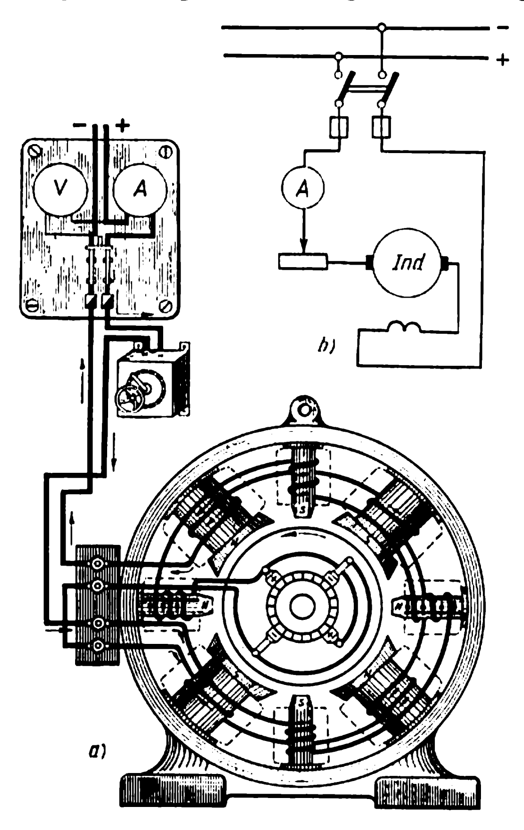


Fig. 296. Moteur à excitation série:
a — organisation; *b* — schéma de branchement sur le réseau

démarrage quand le moteur doit vaincre rapidement l'inertie de la charge appliquée à son arbre.

Dans un moteur à excitation en dérivation le couple moteur est proportionnel à la puissance première du courant. Pour cette raison, pour le même courant de démarrage, toutes les autres conditions étant égales, le moteur série

développe un couple plus grand qu'un moteur à excitation en dérivation.

La vitesse d'un moteur série varie fortement avec la charge, car simultanément avec la variation du courant d'induit varie également le flux magnétique des pôles. La formule:

$$n = \frac{U - I_{ind} r_{ind}}{c\Phi}$$

montre que pour une tension constante la vitesse de rotation du moteur est inversement proportionnelle à la valeur du flux magnétique. Pour cette raison, un moteur en charge, absorbant un fort courant, a un grand flux magnétique et une petite vitesse. Lorsque la charge sur l'arbre diminue, le flux magnétique diminue également et la vitesse augmente.

Ainsi, lorsqu'on diminue considérablement la charge sur l'arbre d'un moteur série ou lorsque la charge disparaît complètement, le courant d'induit et le flux Φ diminuent fortement et comme le montre la dernière formule la vitesse du moteur augmente de façon à devenir dangereuse pour la machine. Pour cette raison, la marche du moteur série à vide ou à faible charge est inadmissible car il peut s'emballer. Les moteurs de ce type ne doivent pas être accouplés à une machine entraînée par une courroie car la rupture ou la chute de celle-ci provoquerait l'emballement du moteur.

Le réglage de la vitesse d'un moteur série se fait par variation de la tension d'alimentation ou par variation du flux magnétique. Pour le réglage de la vitesse d'après la première méthode on insère dans le circuit du moteur un rhéostat de réglage spécial (en plus du rhéostat de démarrage) ou l'on utilise un seul rhéostat qui sert aussi bien pour le démarrage et pour le réglage de la vitesse. Cette méthode n'est pas économique car une grande quantité d'énergie est perdue dans le rhéostat sous forme de chaleur. Le réglage du flux magnétique des pôles et, par conséquent, de la vitesse du moteur peut être assuré à l'aide d'un rhéostat branché en parallèle avec l'enroulement d'excitation du moteur. En modifiant la résistance du rhéostat, on peut faire varier le courant passant par l'enroulement d'excitation. Parfois on divise l'enroulement d'excitation en plusieurs sections et, en les couplant en série ou en parallèle, on peut modifier le flux magnétique du moteur. Dans le même but les schémas de certains moteurs permettent de

mettre hors circuit une partie des spires de l'enroulement d'excitation. Lors du travail simultané de plusieurs moteurs série on peut utiliser leur couplage en série ou en parallèle pour le réglage de la vitesse.

Les moteurs série sont utilisés comme moteurs de traction des locomotives électriques, des motrices de métro, de tramway, sur les ponts roulants, etc.

§ 150. MOTEUR À EXCITATION COMPOSÉE

Le schéma d'un moteur à excitation composée (compound) est représenté par la figure 297. L'existence sur les pôles du moteur de deux enroulements permet d'utiliser les

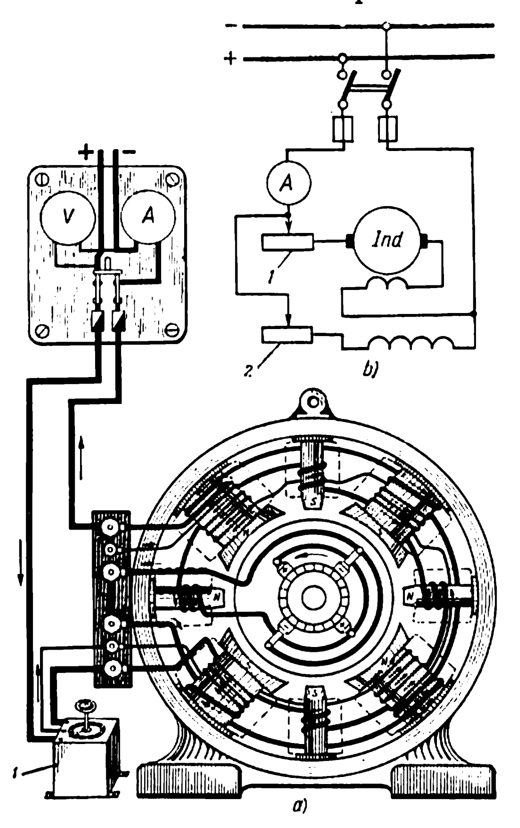


Fig. 297. Moteur à excitation composée:
a — organisation; *b* — schéma de branchement sur le réseau: *1* — rhéostat de démarrage; *2* — rhéostat de réglage

avantages des moteurs à excitation en dérivation et des moteurs à excitation série. Ces avantages sont la constance de la vitesse et le grand couple moteur lors du démarrage.

Grâce à la présence d'un enroulement dérivation le moteur compound ne peut pas s'emballer dans le cas d'une faible charge ou d'absence de celle-ci. Les enroulements d'excitation peuvent être branchés de façon que leurs flux magnétiques possèdent le même sens (flux additif) ou de façon que leurs flux soient opposés (flux soustractif).

En cas de branchement à flux additif, le moteur sera par ses propriétés plus proche d'un moteur dérivation ou d'un moteur série en fonction de l'enroulement possédant une force magnétisante plus grande. Dans le moteur à flux soustractif le flux de l'enroulement série, en augmentant avec la charge, fait diminuer le flux total de sorte que la vitesse du moteur augmente.

Le réglage de la vitesse d'un moteur à excitation composée est réalisé à l'aide d'un rhéostat de réglage inséré dans le circuit de l'enroulement d'excitation en dérivation.

§ 151. CONVERTISSEURS ROTATIFS

Pour transformer le courant alternatif en courant continu et inversement on peut utiliser des convertisseurs rotatifs.

On distingue les types de convertisseurs suivants:

1) groupes moteurs-générateurs,

2) commutatrices,

3) groupes convertisseurs en cascade.

De plus, pour la transformation du courant alternatif en courant continu on utilise des redresseurs qui seront examinés dans le chapitre XIII.

Un groupe moteur-générateur (fig. 298) comprend deux machines séparées; un moteur et une dynamo réunis par une courroie ou dont les arbres sont réunis par un manchon d'accouplement. Si le groupe est utilisé pour la transformation du courant alternatif en courant continu, on utilise un moteur asynchrone ou synchrone et une dynamo à excitation indépendante ou à auto-excitation.

Calculons le rendement total du groupe:

désignons par P_1 la puissance prise par le moteur au réseau et par P_2 la puissance sur l'arbre du moteur. Le

rendement du moteur est:

$$\eta_m = \frac{P_2}{P_1},$$

d'où

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_m}.$$

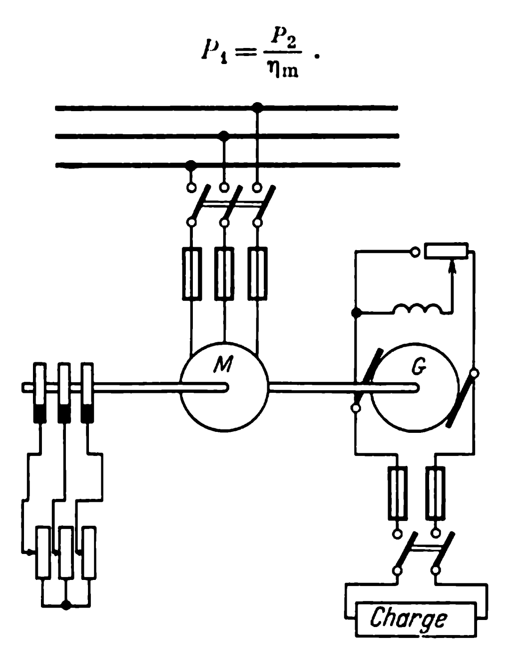


Fig. 298. Schéma d'un groupe moteur-générateur

Désignons par P_3 la puissance reçue par la dynamo et par P_4 la puissance fournie par la dynamo. Le rendement de la dynamo:

$$\eta_d = \frac{P_4}{P_3},$$

d'où

$$P_4 = \eta_d P_3.$$

Le rendement total du groupe:

$$\eta = \frac{P_4}{P_1} = \frac{\eta_d P_3 \eta_m}{P_2}.$$

Si les machines sont calées sur le même arbre, on peut admettre que $P_2 = P_3$; on a donc définitivement:

$$\eta = \eta_m \eta_d.$$

Au cas où les deux machines sont réunies par une courroie ou par un autre type de transmission, le rendement de la transmission $\eta_t = P_3/P_2$ et le rendement total sont égaux au produit des rendements du moteur, de la transmission et de la dynamo:

$$\eta = \eta_m \eta_t \eta_d.$$

Dans le groupe moteur-générateur la tension du courant continu ne dépend pas de la tension du courant alternatif.

Une commutatrice est une dynamo à courant continu qui, en plus du collecteur, comporte également des bagues

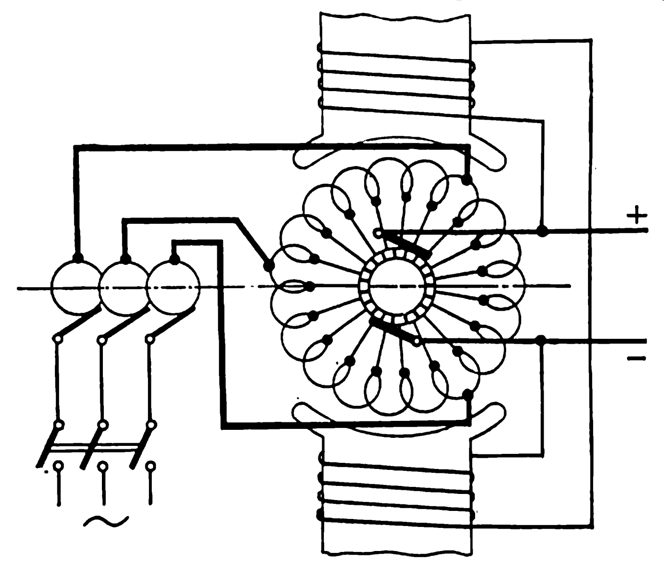


Fig. 299. Schéma d'une commutatrice

de frottement. Dans cette machine la transformation du courant d'un genre en courant d'un autre genre a lieu dans le même induit. Aussi, entre la tension du courant alternatif et celle du courant continu existe une relation déterminée. La figure 299 montre le schéma d'une commutatrice servant à transformer un courant triphasé en courant continu. L'enroulement d'induit est réuni d'un côté de la machine au collecteur. Trois points de l'enroulement d'induit situés sous un angle de 120° (pour une machine bipolaire) sont connectés à trois bagues de frottement calées sur l'arbre de l'autre côté de la machine.

Pour transformer un courant monophasé en courant continu on utilise des commutatrices qui, en plus du collecteur, comportent sur l'arbre deux bagues de frottement connectées à deux points diamétralement opposés de l'enroulement d'induit.

Les commutatrices destinées à transformer un courant hexaphasé en courant continu comportent six bagues de frottement. La commutatrice est excitée du côté du courant continu. Le flux magnétique créé par l'enroulement d'excitation des pôles est commun aux forces électromotrices des courants continu et alternatif qui sont produites dans l'induit de la commutatrice. Nous avons déjà dit qu'il existe une relation déterminée entre les tensions alternative et continue de la commutatrice.

Sans recourir aux calculs, indiquons quelques chiffres:

$U_{alt} = 0{,}72\ U_{cont}$ pour le courant monophasé;
$U_{alt} = 0{,}62\ U_{cont}$ pour le courant triphasé;
$U_{alt} = 0{,}354\ U_{cont}$ pour le courant hexaphasé.

Ces chiffres montrent que la tension du courant continu est toujours supérieure à celle du courant alternatif.

Le calcul montre que les commutatrices hexaphasées sont les plus économiques parce qu'elles fournissent pour le même poids une plus grande puissance que les commutatrices triphasées et monophasées.

Le démarrage d'une commutatrice peut être réalisé par l'une des trois méthodes:

1) du côté courant continu;
2) du côté courant alternatif;
3) à l'aide d'un moteur de démarrage.

Le démarrage d'une commutatrice du côté courant continu est possible lorsqu'on dispose d'une source de courant continu extérieure. On lance la commutatrice comme un moteur à courant continu. Du côté courant alternatif on met la commutatrice au synchronisme avec le réseau et on ferme l'interrupteur du réseau. Ensuite, on débranche la source de courant continu utilisée pour le démarrage et on branche la charge sur la commutatrice.

Le démarrage du côté courant alternatif a lieu par fermeture de l'interrupteur du courant triphasé. L'enroulement d'induit crée un champ tournant qui, en coupant l'enroulement court-circuité logé dans les pièces polaires,

induit un courant dans cet enroulement. Grâce à l'interaction des courants induits et du champ tournant l'induit de la commutatrice commence à tourner. Le flux magnétique des pôles apparaît d'après le même principe que dans une dynamo à auto-excitation. La commutatrice lancée comme un moteur asynchrone en présence d'un flux magnétique constant se met au synchronisme et fonctionne en moteur synchrone.

Le lancement de la commutatrice à l'aide d'un moteur de démarrage n'exige pas d'explications spéciales.

Un convertisseur en cascade comprend un moteur asynchrone et une commutatrice. Les deux machines sont calées sur le même arbre. Le circuit rotorique du moteur asynchrone est couplé en série avec l'induit de la commutatrice.

Ce convertisseur fonctionne du côté courant alternatif comme un moteur synchrone et transforme la puissance de glissement obtenue depuis le rotor du moteur asynchrone en puissance de courant continu.

Questions de contrôle

1. Quelles sont l'appellation et la destination des éléments principaux d'une machine à courant continu ?
2. Quelles sont l'organisation et la destination du collecteur des dynamos ?
3. Quels sont les enroulements d'induit utilisés ?
4. Qu'est-ce que la réaction d'induit ? Quels changements ont lieu dans une dynamo (dans un moteur) sous l'influence de la réaction d'induit ?
5. Qu'est-ce que la commutation et quelles sont les conditions nécessaires pour réaliser une commutation parfaite ?
6. Quels sont les moyens utilisés contre la réaction d'induit ?
7. Quelles sont les mesures prises pour améliorer les conditions de commutation dans les machines à courant continu ?
8. Quelle est l'organisation d'une dynamo à excitation indépendante ? Quels sont ses propriétés, avantages et défauts ?
9. Idem pour une dynamo à excitation en dérivation.
10. Idem pour une dynamo à excitation en série.
11. Idem pour une dynamo à excitation composée.
12. Comment doit-on coupler en parallèle une dynamo à excitation en dérivation ?
13. Pourquoi ne doit-on pas brancher un moteur à courant continu sur le réseau sans un rhéostat de démarrage ?
14. Comment peut-on régler la vitesse d'un moteur à courant continu ?
15. Quelle est l'organisation d'un moteur à excitation en dérivation ? Quels sont ses propriétés, avantages et défauts ?
16. Idem pour un moteur à excitation en série.
17. Idem pour un moteur à excitation composée.

CHAPITRE XIII

REDRESSEURS

§ 152. GÉNÉRALITÉS

De nombreuses branches de la technique exigent l'utilisation du courant continu. La galvanoplastie, la galvanostégie, l'affinage des métaux, la charge des accumulateurs, les chemins de fer électrifiés, la production des champs magnétiques — voilà une liste bien incomplète des domaines où ce genre de courant trouve un emploi exclusif.

Le courant continu peut être obtenu à l'aide des dynamos, des accumulateurs et des piles. Mais le plus souvent, à l'endroit de consommation du courant continu, on dispose du courant alternatif produit par les alternateurs montés dans une centrale. Ce courant alternatif est ensuite transformé en courant continu.

Auparavant, pour la conversion du courant alternatif en courant continu on utilisait des groupes convertisseurs comprenant un moteur à courant alternatif accouplé à une dynamo à courant continu. Le moteur était alimenté par le réseau alternatif et actionnait la dynamo qui produisait le courant continu. A l'heure actuelle, les groupes moteurs-générateurs sont rarement utilisés et on emploie généralement des dispositifs spéciaux appelés *redresseurs* qui transforment le courant alternatif en courant continu.

Le plus souvent on utilise les redresseurs secs et les redresseurs à vapeur de mercure. Nous allons examiner en détail les deux types.

Dans les *redresseurs secs* les différentes parties sont des corps solides. Parmi les redresseurs secs les plus répandus sont les redresseurs à l'oxyde de cuivre et les redresseurs au sélénium, au silicium et au germanium.

Les *redresseurs à vapeur de mercure* peuvent être soit à enveloppe de verre, soit à enveloppe métallique.

Il existe encore d'autres redresseurs: mécaniques, électrolytiques, kénotrons, à valves à gaz. Les kénotrons (re-

dresseurs à tube) sont largement utilisés en radiotechnique et font partie de la plupart des postes récepteurs modernes alimentés par le secteur alternatif, dans les appareils à rayons X, etc. Les redresseurs à valves à gaz sont employés dans les installations de trempe à haute fréquence.

§ 153. REDRESSEURS À L'OXYDE DE CUIVRE

La figure 300 montre la constitution d'un élément de redresseur à l'oxyde de cuivre. La rondelle de cuivre *1* représente une électrode. Elle est recouverte d'oxyde de cuivre *2*.

Pour obtenir sur la rondelle de cuivre une couche d'oxyde de cuivre (Cu_2O) on la porte à une température élevée et puis on la refroidit rapidement dans l'eau froide.

La seconde électrode est formée par une plaque métallique *3* appliquée à la surface de la couche d'oxyde de cuivre. Généralement, on utilise en tant que seconde électrode une plaque de plomb assurant un bon contact grâce à la plasticité de ce métal.

A la limite entre le conducteur (cuivre) et le semi-conducteur (oxyde de cuivre) prend naissance une fine couche dont l'épaisseur est de quelques cent millièmes de millimètre et qui présente une grande résistance. Cette couche est appelée couche d'arrêt.

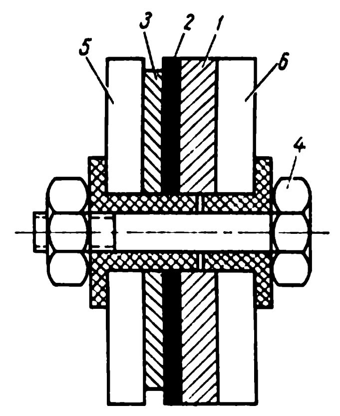


Fig. 300. Organisation d'un élément de redresseur à l'oxyde de cuivre

De cette façon, le redresseur comprend trois couches: la première, couche métallique, possède des électrons libres en grande concentration. La deuxième, couche isolante (couche d'arrêt), est privée d'électrons libres et la troisième, couche semi-conductrice, a une faible quantité d électrons libres. Lorsque entre les couches extrêmes il existe une différence de potentiel, dans la couche d'arrêt apparaît un fort champ électrique qui contribue à l'arrachement des électrons libres des couches adjacentes. Si on porte le cuivre à un potentiel négatif et l'oxyde de cuivre

à un potentiel positif, le nombre d'électrons libres arrachés au cuivre sera grand et un courant circulera dans le circuit dans le sens allant de l'oxyde de cuivre vers le cuivre. Pour une polarité inverse, le nombre d'électrons arrachés à la couche d'oxyde de cuivre sera très petit, de sorte que le courant dans le circuit sera pratiquement nul.

La conductibilité en sens unique du système oxyde de cuivre-cuivre peut être utilisée pour le redressement du courant alternatif.

Lors du montage d'un redresseur, on place ses différents éléments sur un boulon isolé *4* et on les serre entre deux rondelles en laiton *5* et *6*.

A un élément du redresseur peut être appliquée une tension ne dépassant pas 4 à 8 V. Pour une tension supérieure on connecte les plaques en série. La densité maximale du courant des redresseurs à l'oxyde de cuivre est de 0,1 à 0,15 A/cm² pour une tension admissible de 8 V par couche redresseuse. Pour de forts courants on augmente les dimensions des plaques ou on les branche en parallèle.

Pour évacuer la chaleur on place entre les rondelles de cuivre des disques métalliques de grand diamètre appelés radiateurs.

La durée de service des redresseurs à l'oxyde de cuivre est de 12 à 15 ans, leur rendement est d'environ 70 %.

Les redresseurs à l'oxyde de cuivre sont utilisés pour alimenter les circuits de signalisation ferroviaire, en radiotechnique, pour la charge des accumulateurs, pour l'alimentation des appareils de mesure électriques à redresseur permettant aux appareils magnéto-électriques de mesurer les courants et les tensions alternatifs, etc.

§ 154. REDRESSEURS AU SÉLÉNIUM

Le sélénium est un élément chimique (Se) qu'on trouve à l'état libre dans les gisements de soufre. Dans l industrie, on obtient le sélénium à partir des déchets de la production de l'acide sulfurique ainsi que des dépôts obtenus lors de l'affinage électrolytique du cuivre. Dans son état courant le sélénium est une substance solide grise à température de fusion de 220 °C et à poids spécifique de 4,8. Le sélénium peut changer sa conductibilité électrique en fonction de l'éclairement. Cette propriété est utilisée dans les cellules photo-électriques.

La figure 301 représente un élément d'un redresseur au sélénium. Une électrode est formée par une rondelle de fer nickelée *1* sur laquelle est portée une fine couche de sélénium *2*. L'autre électrode est représentée par la couche *3* en un alliage conducteur de bismuth, d'étain et de cadmium (Bi, Sn, Cd) appliqué au sélénium par atomisation. Contre cette couche, dite de revêtement, est serrée une rondelle de contact *4* en laiton. Pour brancher l'élément dans le circuit on utilise les lames *5* et *6* qui touchent les deux électrodes. A la limite de la couche de revêtement et de la couche de sélénium apparaît une couche d'arrêt dont la destination a déjà été indiquée dans la description des redresseurs à l'oxyde de cuivre.

Fig. 301. Organisation d'un élément d'un redresseur au sélénium

La densité de courant admissible d'un redresseur au sélénium est comprise entre 0,2 et 0,3 A/cm². La tension par élément ne doit pas dépasser 16 à 18 V (selon le diamètre des rondelles), le rendement est d'environ 80 %.

Les redresseurs au sélénium sont utilisés pour les mêmes buts que les redresseurs à l'oxyde de cuivre, sauf pour les appareils de mesure électriques à redresseur, vu leurs caractéristiques instables.

§ 155. REDRESSEURS AU GERMANIUM

Les redresseurs au germanium et au silicium sont largement utilisés depuis la deuxième guerre mondiale.

Les redresseurs au silicium et au germanium (diodes, détecteurs) ont l'avantage de ne pas dépenser d'énergie pour l'échauffement des filaments indispensables dans les tubes électroniques, ne sont pas sensibles aux secousses, sont faciles à fabriquer, ont de petites dimensions (quelques millimètres) ; ils ont une longue durée de service et sont fiables. Si le rendement des redresseurs à l'oxyde de cuivre est de 70 à 75 % et celui des redresseurs au sélénium est d'environ 80 %, le rendement des redresseurs au

germanium dépasse 95 % et la densité de courant qu'ils peuvent supporter est beaucoup plus grande que dans les redresseurs à l'oxyde de cuivre et au sélénium. Les dispositifs au germanium et au silicium sont aussi employés pour l'amplification des oscillations radio-électriques (dans les amplificateurs et dans les générateurs). Dans les redresseurs

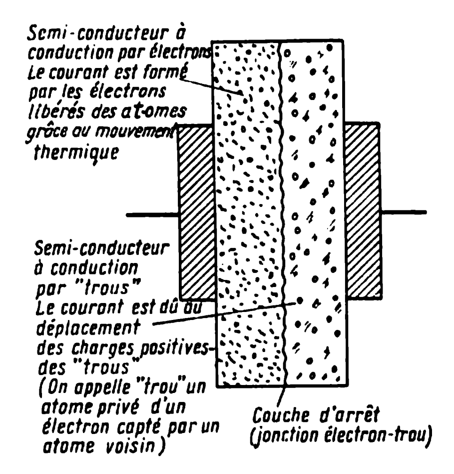


Fig. 302. Principe de fonctionnement d'un redresseur au germanium (au silicium)

au germanium ou au silicium on utilise des semi-conducteurs à conductibilité par électrons et à conductibilité par lacunes (trous).

Comme nous l'avons déjà indiqué, l'appartenance d'un conducteur ou d'un semi-conducteur à un tel ou tel type de conductibilité est déterminée en premier lieu par les impuretés qui s'y trouvent presque toujours. Si les impuretés cèdent facilement des électrons, la substance appartient aux conducteurs ou semi-conducteurs à conductibilité par électrons. Si les impuretés absorbent des électrons, la substance est à conductibilité par lacunes. A la limite séparant les semi-conducteurs de différents types (à électrons ou à lacunes) en contact il se forme une couche d'arrêt ne laissant passer le courant que dans un seul sens (fig. 302). L'effet de redressement repose sur cette propriété des semi-conducteurs. Les redresseurs à semi-conducteurs dont la constitution est simple et compacte remplacent les redres-

seurs à vapeur de mercure, les groupes convertisseurs, ainsi que les tubes redresseurs utilisés pour la conversion de courant alternatif en courant continu. Le germanium et le silicium conviennent le mieux pour la construction des redresseurs. Le type de leur conductibilité dépend des impuretés (par exemple, de l'indium). Le germanium est un élément chimique (Ge) à nombre atomique 32 et à poids atomique 72,6. C'est un métal fragile grisâtre qui, par ses

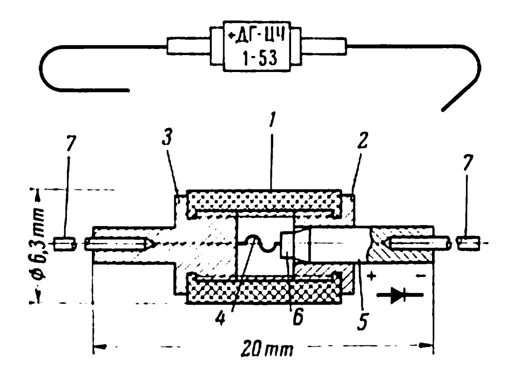


Fig. 303. Organisation d'un redresseur au germanium et son aspect extérieur:

1 — douille céramique; *2-3* — broches inférieure et supérieure du détecteur; *4* — ressort de contact; *5* — porte-cristal; *6* — plaque de germanium; *7* — fils de sortie

propriétés, est proche de l'étain. Son poids spécifique est de 5,4 et la température de fusion est de 959 °C. Le silicium est un élément chimique (Si) à nombre atomique 14 et à poids atomique 28,06. C'est un métalloïde qui est une des composantes principales de l'écorce terrestre, des pierres, du sable, du verre, etc. Son poids spécifique est de 2,6 à 2,7 et la température de fusion est de 1450°. L'indium est un élément chimique rare (In) à nombre atomique 49 et à poids atomique 114,76. C'est un métal blanc doux à poids spécifique 7,3 et à température de fusion d'environ 1500°.

La figure 303 montre l'aspect extérieur et la coupe d'un redresseur au germanium (diode) utilisé en radiotechnique pour redresser les courants de haute fréquence.

Le redressement du courant se passe au point de contact d'un ressort (conductibilité par électrons) avec une plaque

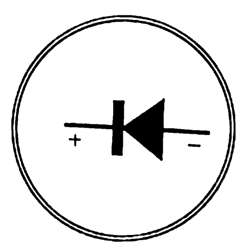


Fig. 304. Symbole graphique des redresseurs pour les schémas électriques

Fig. 305. Schéma de redressement à une seule alternance du courant monophasé

Fig. 306. Schéma de redressement à deux alternances du courant monophasé

Fig. 307. Schéma de montage en pont de quatre éléments du redresseur :

a — redresseur à deux alternances; *b* — redresseur en plusieurs éléments monté suivant ce schéma

de germanium (conductibilité par lacunes). La faible capacité propre et les dimensions réduites d'un tel redresseur permettent de l'utiliser en radiotechnique. Cependant, les courants redressés par les électrodes à pointes sont faibles et les redresseurs puissants sont à grandes surfaces.

§ 156. SCHÉMAS DE MONTAGE DES REDRESSEURS SECS

La figure 304 montre la désignation des redresseurs sur les schémas électriques, la pointe de la flèche indiquant le sens du courant.

Pour redresser un courant alternatif monophasé on peut utiliser le schéma de la figure 305. La partie inférieure de la sinusoïde du courant alternatif est découpée par le redresseur et dans le circuit venant après le redresseur circule un courant ondulé avec une interruption d'une demi-période.

C'est le schéma de redressement à une seule alternance.

La figure 306 montre le schéma de redressement du courant monophasé avec utilisation du point médian de l enroulement secondaire du transformateur. Les flèches en traits continus indiquent le sens du courant durant une alternance et les flèches en pointillé montrent le sens du courant pendant la deuxième alternance. Le circuit extérieur est toujours parcouru par un courant ondulé. Mais à la différence du montage précédent, il n'y a pas d'interruptions de courant, car les deux moitiés de la sinusoïde du courant alternatif sont utilisées. C'est le schéma de redressement à deux alternances.

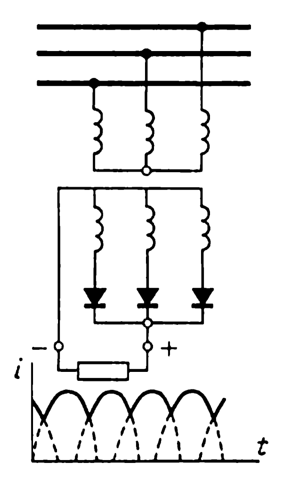


Fig. 308. Schéma de redressement du courant triphasé

La figure 307 représente un schéma en pont avec quatre redresseurs qui permet d'utiliser les deux moitiés de la sinusoïde du courant alternatif ; c'est donc aussi un schéma de redressement à deux alternances. Le sens du courant

pendant la première demi-période est indiqué par des flèches continues et pendant la deuxième demi-période par des flèches en pointillé. La connexion réelle du redresseur selon le schéma de principe (fig. 307, *a*) est indiquée sur la fig. 307, *b*.

Le schéma de redressement d'un courant triphasé est indiqué sur la figure 308.

§ 157. KÉNOTRON

La figure 309 représente un ballon de verre *1* dont l'air est évacué de façon à créer un vide poussé (environ 0,0000001 mm de Hg). L'évacuation de l'air du ballon se fait à l'aide de pompes à mercure spéciales, après quoi on élimine les restes de gaz par chauffage du ballon. Avec

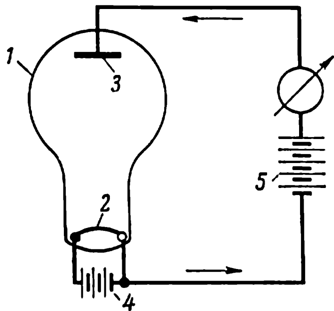


Fig. 309. Principe de fonctionnement d'un kénotron

un tel vide poussé on peut considérer que l'espace à l'intérieur du ballon ne contient pratiquement pas de gaz. Dans la partie inférieure du ballon se trouve une électrode appelée cathode *2*, dans la partie supérieure se trouve une autre électrode dite anode *3*. La cathode, fabriquée sous forme de filament en métal réfractaire (tantale, molybdène, tungstène), est branchée sur une batterie d'accumulateurs de chauffage *4* ou sur une autre source de courant à tension comprise entre 4 et 6 V. La batterie de chauffage et le filament de chauffage forment le circuit de cathode.

On sait que dans les métaux il y a un grand nombre d'électrons libres. A température ordinaire, l'énergie cinétique des électrons libres est si basse qu'ils ne peuvent pas quitter la surface du métal. Mais si l'on chauffe le

métal à une température élevée, la vitesse des électrons libres et leur énergie cinétique augmentent et le métal incandescent commence à émettre des électrons. Ce phénomène est appelé *émission thermo-électronique.*

Le filament réchauffé par le courant électrique venant de la batterie de chauffage émet des électrons qui s'accumulent près du filament, en formant un « nuage » électronique qui empêche les électrons de quitter la surface du filament. En branchant une autre batterie d'accumulateurs *5* (batterie d'anode) à tension comprise entre 80 et 100 V de façon que le « + » de la batterie soit connecté à l'anode et le « — » à la cathode, on obtiendra un champ électrique entre le filament cathodique et l'anode à l'intérieur du ballon de verre.

Sous l'action des forces de champ électriques, les électrons émis par le filament se mettent en mouvement en se dirigeant vers l'anode. De l'anode ils se dirigent par le circuit extérieur et par la batterie d'anode vers la cathode. Dans le circuit s'établit alors un courant électrique dont le sens dans le ballon de verre est de l'anode vers la cathode. L'itinéraire suivi par le courant depuis la cathode vers l'anode dans le circuit extérieur est appelé circuit d'anode.

En augmentant la tension de la batterie anodique on augmente le courant anodique. Ceci s'explique par le fait qu'avec l'accroissement du potentiel de l'anode un nombre de plus en plus grand d'électrons atteint l'anode. Enfin, pour un certain potentiel d'anode, le courant dans le circuit d'anode cesse d'augmenter. Le courant anodique maximal pouvant être obtenu pour un chauffage donné de la cathode est appelé *courant de saturation.* Le nombre d'électrons émis par la cathode incandescente dépend de la surface de la cathode et de sa température. La température du filament en tungstène atteint généralement 2300 à 2500 °C. Un échauffement du filament en tungstène supérieur à cette température provoque un accroissement de la puissance destinée à l'échauffement du filament ainsi qu'une forte réduction de la durée de vie de la cathode.

De nombreuses expériences ont été faites avec des filaments de matériaux différents afin de trouver un filament qui pourrait donner un courant de saturation plus intense à température plus basse. Il a été constaté que l'addition de l'oxyde de thorium au tungstène augmente considérablement le courant émis. A l'heure actuelle, les cathodes thoriées

sont fabriquées en tungstène dont la surface est couverte par une méthode spéciale d'une couche très fine de thorium. Les cathodes thoriées sont généralement chauffées à une température allant de 1600 à 1850 °C. On a également établi que les oxydes des métaux alcalino-terreux (barium, calcium, strontium) chauffés à 1000° fournissent un flux d'électrons très intense.

Les filaments métalliques (en nickel) couverts d'une couche d'oxyde de métaux alcalino-terreux sont appelés *cathodes oxydées*. La température de travail de ces filaments est de 900 à 1200 °C.

Les électrons émis par le filament sous l'action du champ électrique se dirigent vers l'anode et leur vitesse augmente

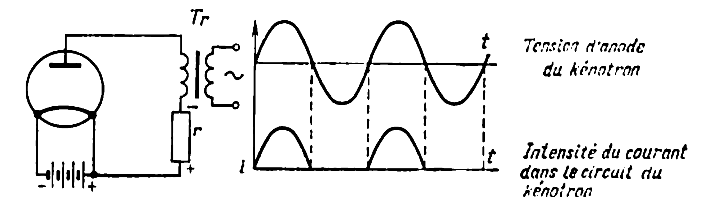


Fig. 310. Schéma de montage d'un kénotron

au fur et à mesure qu'ils s'approchent de celle-ci. En frappant la surface de l'anode, les électrons lui transmettent leur énergie cinétique en provoquant l'échauffement de la plaque anodique. Les anodes sont généralement fabriquées en nickel ou en molybdène.

Si l'on connecte le pôle « — » de la batterie anodique à l'anode, les électrons émis par la cathode seront repoussés par la charge négative de celle-ci et le courant ne circulera pas dans le circuit anodique. Par conséquent, le courant dans le circuit anodique ne peut circuler que dans un seul sens : de l'anode vers la cathode, c'est-à-dire lorsque l'anode est chargée positivement par rapport à la cathode. Cette propriété du tube électronique de laisser passer le courant dans un seul sens est utilisée pour le redressement du courant alternatif. En appliquant au circuit anodique une tension alternative on obtient dans le circuit anodique du tube un courant redressé ondulé. Le tube utilisé à cette fin est appelé *kénotron*.

La figure 310 représente le schéma de montage d'un kénotron. Ce schéma présente le défaut d'utiliser seulement

une alternance du courant et, pour cette raison, on l'appelle schéma de *redressement à une seule alternance*. Pour utiliser le courant pendant une période entière on utilise des schémas de redressement à deux alternances. La figure 311 schématise un montage utilisant deux kénotrons et la figure 312

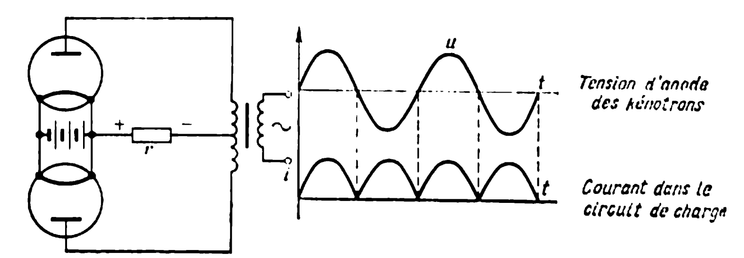


Fig. 311. Schéma de montage de deux kénotrons

un montage équipé d'un kénotron à deux anodes. Dans ce dernier, la cathode est alimentée par le courant alternatif venant d'un enroulement spécial du transformateur. Pour lisser les pulsations du courant redressé on utilise un filtre comprenant des condensateurs et des bobines à noyau de fer.

On peut représenter le courant ondulé redressé comme comprenant deux composantes dont l'une est continue

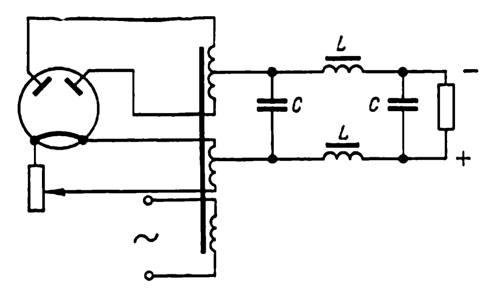


Fig. 312. Schéma d'un kénotron à deux anodes

et l'autre alternative. Pour la composante continue les condensateurs présentent une très grande résistance. Par contre, les bobines qui n'ont pas de réactance en courant continu lui permettent de passer librement par le filtre. Pour la composante alternative, les condensateurs présentent

une très faible résistance tandis que les bobines offrent une très grande réactance d'induction.

Une telle disposition des condensateurs et des bobines d'inductance, indiquée sur la figure 312, permet à la composante alternative de passer librement par les condensateurs sans pénétrer dans le récepteur. En même temps, la composante continue qui passe librement par les bobines est dirigée vers le circuit du récepteur.

Ainsi, le circuit du récepteur est alimenté uniquement en courant continu.

Dans un montage à deux kénotrons ou à un kénotron comportant deux anodes, le courant passe par l'anode qui à l'instant considéré est positive par rapport à la cathode. Le point milieu de l'enroulement du transformateur fournissant la tension aux anodes du kénotron sert de pôle«—» du circuit à courant continu. Le point milieu de l'enroulement de chauffage de la cathode sert de pôle«+» du circuit à courant continu. Les kénotrons sont utilisés dans les récepteurs radio fonctionnant sur secteur alternatif, les appareils destinés aux essais des câbles, les appareils à rayons X, etc.

§ 158. REDRESSEURS À VAPEUR DE MERCURE À ENVELOPPE DE VERRE

Le redresseur à vapeur de mercure utilise *l'effet de soupape* d'un arc électrique. Celui-ci, amorcé dans un récipient dans lequel on a fait le vide et introduit du mercure, ne laisse passer le courant que dans un seul sens. Une soupape est un dispositif présentant une faible résistance au courant direct et une grande résistance au courant inverse.

Au point de vue construction on distingue deux types de redresseurs à vapeur de mercure : redresseurs à enveloppe de verre et redresseurs à enveloppe métallique.

Examinons l'organisation et le principe de fonctionnement d'un redresseur à enveloppe de verre. Dans un récipient de verre *1* (fig. 313) on verse du mercure *2*. Dans la partie supérieure du récipient une électrode en charbon *3* est scellée. L'air est évacué et le récipient scellé.

Si l'on connecte une batterie d'accumulateurs *4* de façon que son pôle positif soit relié à l'électrode de charbon (anode) et le pôle négatif à l'autre électrode formée par le mercure (cathode), un champ électrique se forme entre l'anode et la cathode.

Même à température ordinaire le mercure s'évapore et sa vapeur remplit le récipient. Si, à l'aide d'un dispositif spécial, on provoque une décharge en arc dans le ballon, des électrons quitteront la surface du mercure que l'on appelle tache cathodique, et sous l'effet du champ électrique se dirigeront vers l'anode. Lors de leur mouvement, les électrons entrent en collision avec les molécules neutres de la vapeur de mercure. Une ionisation par choc a lieu, ce qui fait apparaître des ions positifs et négatifs.

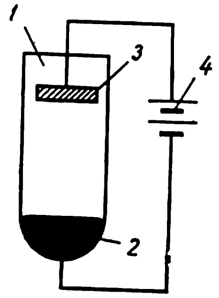


Fig. 313. Organisation d'un redresseur à vapeur de mercure à enveloppe de verre

Le processus d'ionisation de la vapeur de mercure est accompagné de l'apparition dans le ballon du redresseur d'une intense luminescence de couleur violette. Le courant électrique commence à circuler dans le circuit. Les électrons et les ions négatifs de mercure se dirigent vers l'anode. En même temps, les ions positifs attirés par la cathode frappent la surface du mercure et forment la tache cathodique incandescente mentionnée plus haut. Le champ électrique formé par les charges positives des ions contribue à l'arrachement

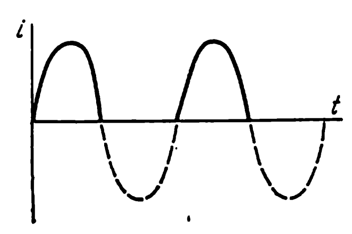


Fig. 314. Courant redressé dans le circuit d'un redresseur à vapeur de mercure

des électrons depuis la surface du mercure et à la formation d'un flux d'électrons.

Le contact de la vapeur de mercure avec les parois froides du récipient de verre provoque la condensation de celle-ci et le mercure s'écoule vers le bas.

Si l'on connecte une batterie d'accumulateurs de façon que son pôle «−» soit réuni à l'électrode de charbon *3* et le pôle «+» à l'électrode en mercure *2*, pour les mêmes conditions

(existence de la tache cathodique) le courant ne pourra pas circuler dans le circuit. Un récipient avec du mercure, branché dans un circuit à courant alternatif, ne laisse passer le courant que dans un seul sens et transforme le courant alternatif en courant ondulé.

Sur la figure 314 on voit la courbe d'un courant alternatif monophasé. Si chaque demi-période supérieure de la sinusoïde correspond au sens du courant dirigé depuis l'électrode froide vers l'électrode chaude, le courant dans le circuit ne circulera que pendant la durée de cette demi-période. Chaque demi-période négative de la sinusoïde sera coupée et le courant ne circulera pas pendant la durée de la demi-période négative. On obtient donc un courant ondulé dans le circuit.

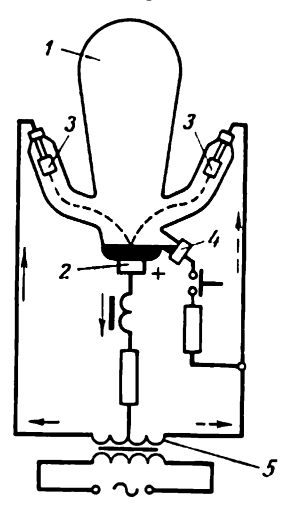


Fig. 315. Schéma de montage d'un redresseur à vapeur de mercure à deux anodes à enveloppe de verre dans le circuit à courant monophasé

Afin d'éviter les interruptions du courant, les redresseurs à vapeur de mercure monophasés sont à deux anodes. La figure 315 schématise le montage d'un redresseur à deux anodes utilisé dans le circuit à courant monophasé. De tels redresseurs sont fabriqués pour un courant ne dépassant pas 50 A et une tension ne dépassant pas 500 V. Dans le ballon de verre *1* on a fait le vide et on remplit l'espace avec de la vapeur de mercure sous une pression de 0,001 à 0,05 mm de Hg. Dans la partie inférieure du ballon se trouve le mercure liquide à l'intérieur duquel est introduite une tige en molybdène *2* scellée dans le verre du ballon. Deux anodes en graphite *3* sont situées dans les cornes en verre du ballon. Pour amorcer l'arc on a prévu une anode complémentaire *4* avec une faible quantité de mercure.

Pour le démarrage d'un redresseur on appuie sur le bouton dans le circuit d'allumage et on incline le ballon de verre de sorte que le mercure de l'anode d'allumage *4* communique avec le mercure de la cathode *2*. Lorsque le ballon reprend sa position initiale, le mercure est rompu

en deux parties et à l'endroit de la coupure apparaît un arc électrique ayant pour base la tache cathodique. Les électrons quittent la surface de la cathode et se dirigent vers les anodes principales. En branchant la résistance du récepteur entre la cathode du ballon du redresseur (« + » du circuit extérieur) et le point milieu du transformateur *5* (« — » du circuit extérieur), on obtient un courant redressé.

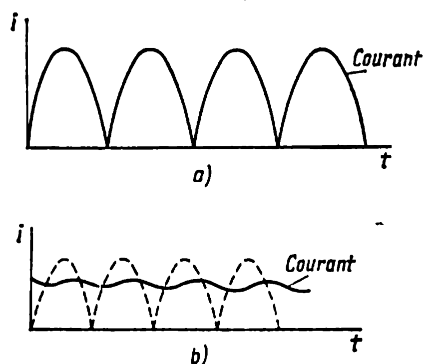


Fig. 316. Courbes du courant redressé par un redresseur à deux anodes branché dans le circuit à courant monophasé: *a* — sans bobine d'inductance; *b* — avec bobine d'inductance

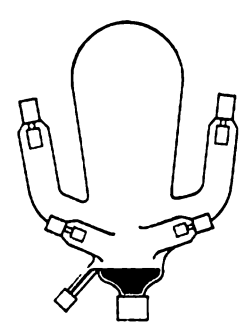


Fig. 317. Redresseur à vapeur de mercure à enveloppe de verre à excitation indépendante

Les flèches en traits continus indiquent le sens du courant lorsque la demi-onde du courant alternatif est positive et les flèches en pointillé indiquent le sens du courant lorsque la demi-onde est négative.

La figure 316, *a* montre qu'à certains moments le courant redressé est nul. A ces instants l'arc dans le redresseur peut s'éteindre et on sera obligé à l'amorcer de nouveau. Pour lisser l'ondulation de courant, on branche dans le circuit du redresseur une bobine d'inductance comportant un noyau de fer. La figure 316, *b* montre une courbe de courant redressé dans un circuit comportant une bobine.

Lorsque l'anode est soumise à une haute température elle commence également à émettre des électrons et le redresseur laisse passer les deux demi-ondes de la sinusoïde de courant alternatif. Ce phénomène est appelé *allumage en retour*. Il peut avoir lieu en cas d'un mauvais refroidissement du redresseur, d'une surcharge, de la présence de

gaz étrangers dans le ballon. L'allumage en retour est accompagné d'un court-circuit de l'enroulement secondaire du transformateur d'alimentation. Pour protéger le dispositif contre les courts-circuits on monte des disjoncteurs rapides qui débranchent le redresseur en cas d'un allumage en retour.

Pour redresser les courants de haute tension on utilise des redresseurs dont les anodes sont placées dans des bras de verre. Les redresseurs de haute tension sont fabriqués pour des tensions de 3000, 10 000 V, etc.

Lorsque le courant dans le circuit diminue brusquement ou disparaît complètement, l'arc dans le ballon peut s'éteindre et il faudra l'amorcer de nouveau. Pour empêcher ce phénomène de se produire on utilise des redresseurs à excitation indépendante. La figure 317 schématise l'organisation du ballon d'un redresseur à vapeur de mercure à excitation indépendante. Les anodes d'excitation indépendante (généralement au nombre de deux) sont alimentées par un transformateur spécial. Elles sont destinées à maintenir l'arc en cas d'une brusque diminution ou de la disparition totale du courant redressé.

Les redresseurs à vapeur de mercure de basse tension dont le courant dépasse 20 A ainsi que les redresseurs de haute tension sont refroidis par un ventilateur électrique.

Pour transformer le courant triphasé en courant continu on emploie des redresseurs triphasés (fig. 318). Les anodes principales du redresseur sont alimentées par un transformateur triphasé. Le point neutre du transformateur forme le pôle négatif du circuit à courant continu. La cathode du redresseur forme le pôle positif du circuit à courant continu. Les anodes d'excitation indépendante sont alimentées par un transformateur spécial TrEx par l'intermédiaire des bobines d'inductance L_1 et L_2. La résistance sert à limiter le courant dans le circuit d'allumage. Le ventilateur électrique destiné à refroidir le ballon est mis en circuit simultanément avec le transformateur.

Lors du redressement d'un courant triphasé, les courbes du courant redressé se recouvrent et l'ondulation du courant devient donc inférieure à celle qu'on a dans un circuit à courant monophasé (fig. 319). La bobine d'inductance est utilisée dans ce cas seulement pour lisser l'ondulation du courant redressé.

La désignation du type des redresseurs à vapeur de mercure fabriqués en U.R.S.S. comprend des lettres et des

chiffres. La lettre B désigne le ballon du redresseur; le chiffre devant cette lettre indique le nombre d'anodes de service du ballon. La lettre H indique l'existence d'un

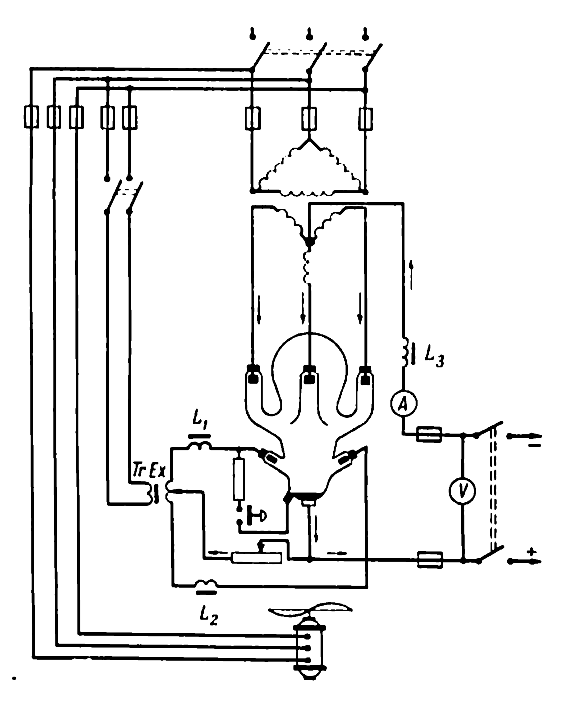


Fig. 318. Redresseur à vapeur de mercure triphasé à enveloppe de verre et son branchement sur le réseau

système d'excitation indépendante. Le chiffre qui suit les lettres indique la valeur maximale du courant redressé admissible en ampères.

Pour les redresseurs à haute tension, après le chiffre indiquant le courant on donne la valeur de la tension redressée en volts.

Exemples: 2B-12— ballon d'un redresseur à vapeur de mercure avec deux anodes de service prévu pour un courant redressé de 12 A.

4B-6 — ballon d'un redresseur à vapeur de mercure avec quatre anodes de service prévu pour un courant redressé de 6 A.

ЗВН-6-10 000 — ballon d'un redresseur à vapeur de mercure à trois anodes de service, à excitation indépendante, prévu pour un courant redressé de 6 A, la tension de service maximale étant de 10 000 V.

Les redresseurs à vapeur de mercure ont une faible chute de tension dans l'arc. Selon le type de redresseur, elle est

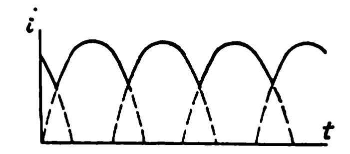


Fig. 319. Courbes du courant triphasé redressé

comprise entre 16 et 25 V. Etant donné leur faible chute de tension, les redresseurs à vapeur de mercure ont un rendement élevé (jusqu'à 86 %).

Les redresseurs à vapeur de mercure à enveloppe de verre sont utilisés pour la charge des batteries d'accumulateurs, l'alimentation des arcs des appareils de projection de cinéma, les réseaux de puissance et d'éclairage à courant continu, pour l'électrolyse, l'alimentation des circuits de commande à courant continu des équipements électriques, etc.

§ 159. REDRESSEURS À VAPEUR DE MERCURE À ENVELOPPE MÉTALLIQUE

Pour les courants dépassant 500 A on utilise des redresseurs à enveloppe (cuve) métallique.

La figure 320 schématise l'organisation d'un tel redresseur. Le corps métallique *1* du redresseur est refroidi par l'eau. La calotte cathodique *2*, isolée du corps, est remplie de mercure. Les anodes principales *3* passent par des bras anodiques *4* qui les protègent contre l'action du mercure provenant de la condensation de la vapeur. A l'intérieur du redresseur sont placées l'anode d'allumage *5* et les anodes d'excitation indépendante *6*. Le bout supérieur de l'anode d'allumage est fixé à un noyau de fer placé dans un solénoïde. Lorsqu'on ferme le circuit alimentant le solénoïde, le noyau est attiré et fait descendre l'anode d'allumage qui plonge pour une courte durée dans le mercure et ensuite revient dans sa position initiale sous l'action d'un ressort.

L'arc apparaissant entre l'anode d'allumage et le mercure passe aux anodes d'excitation qui le maintiennent et ne lui permettent pas de s'éteindre.

Aux endroits de connexion des différentes parties du redresseur sont placées des pièces d'étanchéité qui assurent le maintien du vide à l'intérieur du redresseur. Puisque le fonctionnement efficace des redresseurs dépend surtout du vide maintenu dans leur enveloppe, les redresseurs à cuve métallique sont équipés de pompes destinées à y maintenir un vide poussé.

Le réglage de la tension fournie par les redresseurs se fait à l'aide d'un transformateur à plusieurs prises ou d'un autotransformateur dont les enroulements comportent plusieurs dérivations. En faisant varier la tension du courant alternatif qui alimente le redresseur, on peut faire varier la tension redressée.

L'industrie produit également des redresseurs où le réglage de la tension redressée est exécuté par des grilles commandées 7 (fig. 320) disposées devant les anodes principales.

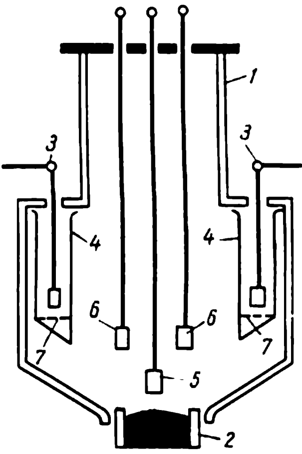


Fig. 320. Organisation schématique d'un redresseur à vapeur de mercure à cuve métallique

Les redresseurs à enveloppe métallique utilisés dans les réseaux triphasés ont trois, six et même douze anodes principales. Les anodes des redresseurs polyphasés sont alimentées par un transformateur dont l'enroulement secondaire fournit, grâce à la connexion convenable de ses parties, un courant hexaphasé ou dodécaphasé.

La figure 321, *a* et *b* représente les schémas de principe des redresseurs à vapeur de mercure triphasés et hexaphasés.

Les redresseurs dont toutes les anodes principales sont placées dans une même cuve sont appelés redresseurs polyanodiques. Ceux dont chaque anode principale est placée dans une cuve séparée sont appelés redresseurs monoanodiques.

L'industrie soviétique livre des redresseurs polyanodiques PMHB-500 et PMHB-1000 ainsi que des redresseurs

monoanodiques des types PMHB-500 × 6, PMHB-1000 × 6, PMHB-500 × 12 et PMHB-1000 × 12.

La désignation PMHB signifie: P — à mercure, M — métallique, H — avec pompes pour maintien du vide, B — à refroidissement par eau. Le nombre qui suit le groupe

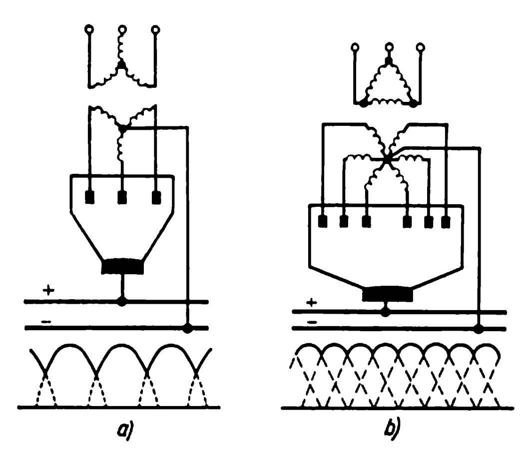


Fig. 321. Schéma de principe d'un redresseur à vapeur de mercure à cuve métallique:
a — pour courant triphasé; b — pour courant hexaphasé

de lettres désigne le courant admissible de la soupape pour la tension de 600 V et le second chiffre indique le nombre de soupapes dans l'ensemble.

Les redresseurs monoanodiques présentent les avantages suivants par rapport aux redresseurs polyanodiques: 1) possibilité d'utiliser les transformateurs triphasés ordinaires au lieu des transformateurs polyphasés spéciaux lors de l'emploi d'un montage de redressement en pont; 2) chute de tension plus faible dans l'arc du redresseur; 3) répartition des arcs de chaque anode dans les corps correspondants où l'on maintient le vide; 4) dimensions plus réduites; 5) rendement plus élevé; 6) meilleures conditions de refroidissement.

Dans les sous-stations (traction de tramways, trolleybus et métro) ainsi que dans les sous-stations des chemins de fer électrifiés on utilise généralement le redresseur PMHB-500 × 6 (fig. 322 et 323). Ce redresseur comprend six soupapes à vapeur de mercure montées sur un cadre

commun. Chaque soupape communique par un robinet avec le tube commun de mise sous vide. L'une des conditions principales du fonctionnement efficace d'un redresseur à vapeur de mercure est la création et le maintien du vide requis. Le personnel de service qui dessert les redresseurs à vapeur de mercure doit y maintenir une pression comprise entre 0,1 et 0,5 micron de Hg (1 micron = 0,001 mm).

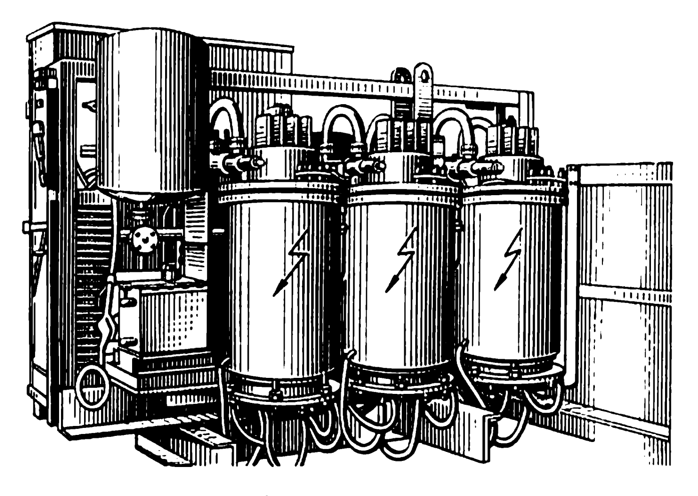


Fig. 322. Aspect extérieur d'un redresseur monoanodique PMHB-500 × 6

L'air et les gaz qui pénètrent dans le redresseur en traversant les dispositifs d'étanchéité ou qui sont dégagés pendant du fonctionnement du redresseur sont retirés par deux pompes dont une pompe est à condensation de vapeur de mercure ou pompe de diffusion et l'autre de prévidage. La pompe de diffusion est réunie au tube de vidage commun par lequel l'air et les gaz restants sont évacués depuis la cuve du redresseur dans le réservoir de prévidage, d'où ils sont refoulés dans l'atmosphère par la pompe de prévidage. Pour mesurer la pression des gaz dans le corps du redresseur, on utilise des manomètres à mercure.

L'appareillage servant à l'allumage et à l'excitation d'un redresseur ainsi que celui destiné à alimenter les grilles commandées sont placés dans l'armoire de commande du redresseur.

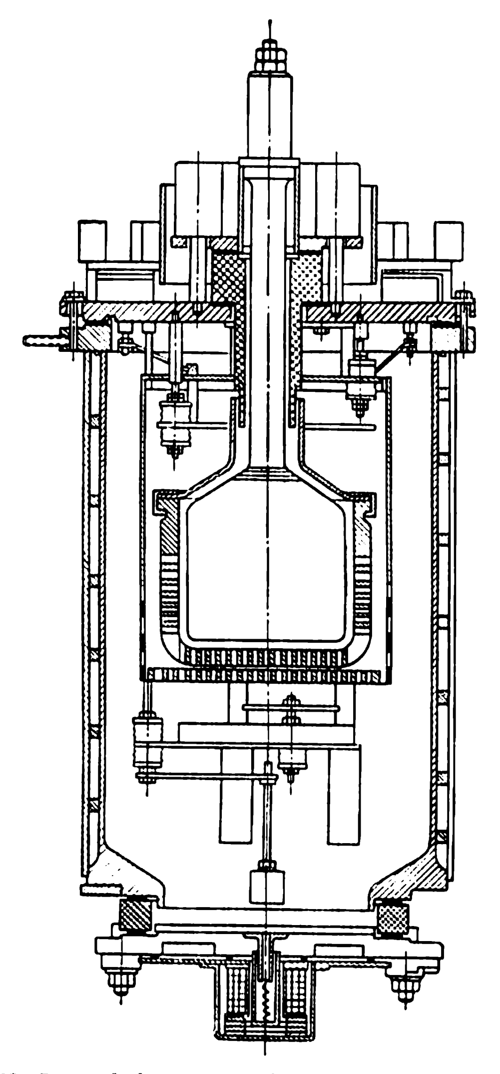


Fig. 323. Coupe de la soupape d'un redresseur monoanodique PMHB-500 × 6

Le refroidissement des redresseurs polyanodiques se fait à l'eau courante en circuit ouvert. A l'aide de tuyaux flexibles l'eau est amenée au redresseur dont elle baigne les parois et ensuite elle est envoyée à l'égout.

Le refroidissement des redresseurs monoanodiques se fait à l'eau distillée en circuit fermé. Une pompe centrifuge refoule l'eau distillée qui enlève la chaleur aux cuves du redresseur, s'échauffe et arrive dans le serpentin d'un échangeur de chaleur qui est refroidi par de l'eau courante. L'eau distillée refroidie dans l'échangeur de chaleur est de nouveau refoulée par la pompe pour refroidir le redresseur.

Les redresseurs métalliques fournissent le courant continu à une tension de 600 V pour les tramways et les trolleybus, de 750 V pour le métropolitain et de 1500 et 3000 V pour les lignes ferroviaires électrifiées.

Questions de contrôle

1. Quelle est la destination des redresseurs? Indiquer leurs types.
2. Comment sont organisés les redresseurs à l'oxyde de cuivre? Quels sont leur principe de fonctionnement et les domaines d'application ?
3. Quelle est l'organisation des redresseurs au sélénium? Quels sont leur principe de fonctionnement et les domaines d'application ?
4. Comment sont organisés les redresseurs au germanium (au silicium) ? Quels avantages offrent-ils par rapport aux redresseurs à l'oxyde de cuivre et au sélénium ?
5. Quel est le principe de fonctionnement des redresseurs à vapeur de mercure ?
6. Quelles mesures prend-on pour réduire l'ondulation de courant fourni par les redresseurs à vapeur de mercure ?
7. Quelle est l'organisation des redresseurs à vapeur de mercure à enveloppe métallique? Quels sont leurs domaines d'emploi ?
8. Par quoi les redresseurs à vapeur de mercure polyanodiques diffèrent-ils des redresseurs monoanodiques?

CHAPITRE XIV

APPAREILS DE MESURE ÉLECTRIQUES

§ 160. GÉNÉRALITÉS

Pour mesurer les grandeurs électriques on utilise des appareils de mesure spéciaux. Les appareils de mesure électriques sont largement employés pour l'exploitation rationnelle, le contrôle et la protection des installations électriques.

Dans les appareils de mesure on distingue une partie fixe et une partie mobile (équipage mobile). Les manifestations du courant électrique (par exemple, ses effets thermique, magnétique et mécanique) sont à la base de l'interaction de la partie mobile et de la partie fixe de l'appareil. Le couple moteur qui apparaît fait tourner l'équipage mobile de l'appareil avec l'indicateur (aiguille).

Sous l'action du couple moteur, l'équipage mobile tourne d'un angle qui est d'autant plus grand que la grandeur mesurée est plus grande. Pour s'opposer au couple moteur il faut créer un couple antagoniste égal et opposé sans quoi l'aiguille déviera toujours jusqu'à la fin de l'échelle pour n'importe quelle valeur de la grandeur mesurée (sauf la valeur nulle).

Généralement, le couple antagoniste est créé à l'aide des ressorts spiraux en bronze phosphoreux.

On sait que le frottement s'oppose toujours au mouvement. Ainsi, lors du mouvement de l'équipage mobile, le frottement s'y oppose en déformant les indications de l'appareil. Pour diminuer le frottement, l'équipage mobile est fixé dans certains modèles sur des pivots placés dans des crapaudines en pierre de grande dureté (rubis, saphir, agate). La figure 324 montre la construction d'un axe et d'une crapaudine des appareils de mesure. Pour protéger les pivots et les crapaudines lors du transport, certains appareils sont dotés d'un dispositif appelé *arrêtoir*, qui soulève l'équipage mobile en l'immobilisant.

Sous l'effet de différentes causes, le couple antagoniste de l'appareil varie. Par exemple, pour diverses températures l'élasticité des ressorts spiraux varie. Dans ce cas, l'aiguille

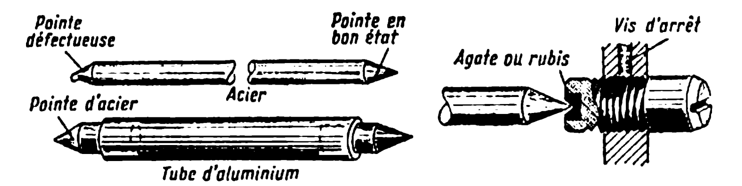


Fig. 324. Construction de l'axe et de la crapaudine d'un appareil de mesure électrique

de l'appareil quitte sa position zéro. Pour remettre l'aiguille dans la position zéro un dispositif appelé *correcteur* est prévu. La figure 325 montre l'équipage mobile d'un appareil de mesure équipé d'un correcteur. L'élément de mesure

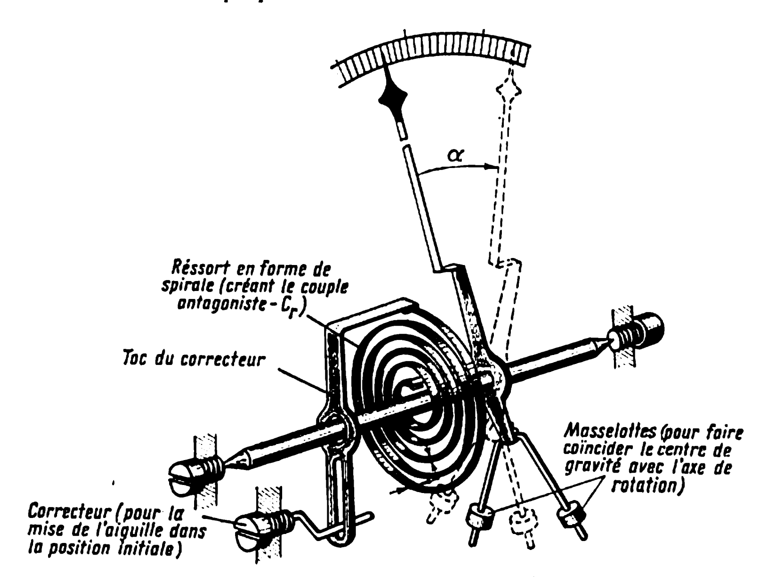


Fig. 325. Construction de l'équipage mobile d'un appareil de mesure électrique avec correcteur

de l'appareil est placé dans un boîtier qui le protège contre toute action mécanique et contre la pénétration de la poussière, de l'eau et des gaz.

L'une des conditions auxquelles doit répondre un appareil de mesure est l'amortissement rapide de son équipage mobile obtenu à l'aide d'amortisseurs utilisant la résistance mécanique du milieu (air, huile) ou les courants induits. La figure 326 montre un amortisseur par frein à air et un amortisseur par courants induits.

La valeur nominale de la grandeur mesurée qui correspond à la limite supérieure de l'étendue de mesure est

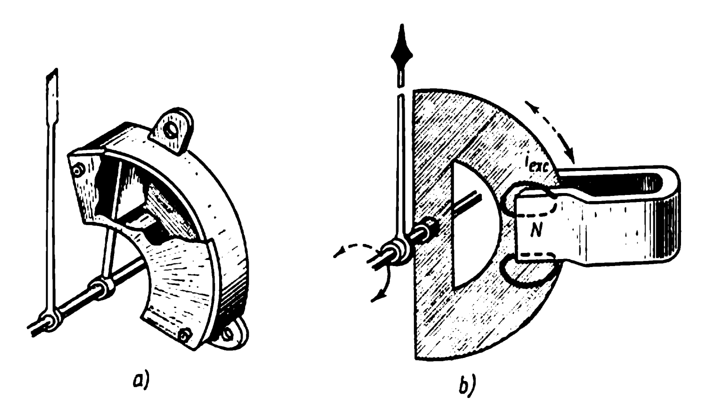


Fig. 326. Construction des amortisseurs:
a — à air; *b* — à aimant permanent

appelée *calibre* d'un appareil. Lors des mesures électriques l'indication de l'appareil diffère généralement de la valeur réelle de la grandeur mesurée.

La différence entre l'indication de l'appareil et la valeur réelle de la grandeur mesurée est appelée *erreur absolue*. Par exemple, lorsqu'un ampèremètre indique une intensité de 5 A et la valeur réelle du courant mesurée par un ampèremètre étalon est de 4,9 A, l'erreur absolue est égale à $5-4{,}9=0{,}1$ A. En connaissant l'erreur absolue de l'appareil on peut introduire la correction nécessaire et obtenir la valeur réelle de la grandeur mesurée.

Le rapport de l'erreur absolue à la valeur réelle de la grandeur mesurée est appelé *erreur relative*. Dans l'exemple cité plus haut, l'erreur relative est:

$$\frac{0{,}1}{4{,}9}=0{,}02 \text{ ou } 2\,\%.$$

La précision de l'appareil lui-même est caractérisée par la limite supérieure de l'erreur réduite. On appelle *erreur* de construction réduite d'un appareil le rapport de l'erreur absolue au calibre de l'appareil. L'erreur réduite déterminée dans les conditions normales (position normale de l'échelle, température de 20°C, absence de champs magnétiques extérieurs, absence au voisinage de l'appareil de grandes masses ferro-magnétiques) est appelée *erreur de construction réduite*. La sensibilité de l'appareil est caractérisée par la variation de l'angle de déviation de l'équipage mobile lors de la mesure d'une grandeur électrique déterminée. Un appareil de mesure électrique branché dans un circuit ne doit pas modifier le régime de fonctionnement de celui-ci et, pour cette raison, la puissance qu'il absorbe doit être minimale.

Les principaux facteurs dont on doit tenir compte lors du choix d'un appareil sont: 1) la fiabilité en service, 2) la facilité d'emploi; 3) la précision; 4) la consommation propre; 5) la présentation extérieure; 6) le poids; 7) le prix.

§ 161. CLASSIFICATION DES APPAREILS DE MESURE ÉLECTRIQUES

Ces appareils peuvent être classés d'après:

— la grandeur à mesurer;
— la nature du courant;
— le degré de précision;
— le principe de fonctionnement;
— le mode de lecture;
— le genre d'emploi.

En outre, on peut distinguer les appareils de mesure d'après:

— le mode de montage;
— le mode de protection contre l'action des champs magnétiques ou électriques extérieurs;
— la capacité de surcharge;
— la possibilité d'être utilisés à différentes températures;
— les cotes d'encombrement et autres indices.

Examinons les principaux indices par lesquels se distinguent les appareils de mesure.

Pour mesurer les grandeurs électriques on utilise des appareils de mesure différents, à savoir: pour mesurer les intensités du courant — les *ampèremètres*; pour mesurer les tensions — les *voltmètres*; pour mesurer les résistances

électriques — les *ohmmètres* ou les *ponts de résistances*; pour mesurer les puissances — les *wattmètres*; pour mesurer l'énergie électrique — les *compteurs*; pour mesurer la fréquence des courants alternatifs — les *fréquencemètres*; pour mesurer le facteur de puissance — les *phasemètres.*

D'après la nature du courant on distingue les appareils pour courant continu, les appareils pour courant alternatif et les appareils pour courant continu et alternatif. D'après le degré de précision ils se divisent en 7 classes: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5 et 4. Les chiffres indiquent en pour cent la limite supérieure de l'erreur relative.

D'après le principe de fonctionnement les appareils se classent en appareils magnéto-électriques, électromagnétiques (ferromagnétiques), électrodynamiques (ferrodynamiques), à induction, thermiques, à lames vibrantes, à thermocouple, à redresseur, etc.

D'après de mode de lecture on distingue les appareils à lecture directe et les appareils enregistreurs.

Selon le genre d'emploi les appareils se classent en appareils fixes, portatifs et pour bancs mobiles.

§ 162. APPAREILS MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES

Les appareils magnéto-électriques sont constitués par un aimant permanent qui agit sur une bobine parcourue par un courant. La figure 327 montre l'organisation d'un tel appareil.

Un puissant aimant permanent *1* en forme de fer à cheval en acier au cobalt, au tungstène ou au nickel-aluminium crée un champ magnétique. Aux extrémités de l'aimant sont rapportées des pièces polaires *2* en acier doux comportant des échancrures cylindriques. Entre les pièces polaires est fixé un cylindre *3* en acier qui sert à diminuer la réluctance du circuit magnétique.

Ce cylindre joue aussi un autre rôle. Grâce au fait que la perméabilité de l'acier est de beaucoup supérieure à celle de l'air, les lignes d'induction sortant des pièces polaires entrent radialement dans le cylindre en formant dans l'entrefer un champ magnétique pratiquement uniforme. Un champ identique est créé lorsque les lignes d'induction sortent du cylindre. Le cylindre est entouré d'un léger cadre en aluminium *4* sur lequel est enroulé une bobine *5* en fil de cuivre isolé. Le cadre est monté sur l'axe *6* logé dans les crapaudines *7*. L'axe porte également une aiguille

8 en aluminium. Le couple antagoniste est créé par deux ressorts en spirale plats *9* servant également à amener le courant à l'enroulement de l'appareil.

Les bornes de l'appareil se trouvent à l'extérieur et sont réunies par des conducteurs aux ressorts spiraux.

Lorsque la bobine est parcourue par un courant l'interaction du courant et du champ magnétique de l'aimant en fer à cheval fait naître une force mécanique dont le sens peut être déterminé d'après la « règle de la main gauche ». De l'autre côté de l'enroulement apparaît une force de même grandeur, mais de sens opposé. Il se forme donc un couple qui fait dévier la bobine. La force d'interaction dépend de l'induction magnétique B, du courant I dans la bobine, du nombre de spires de la bobine n et de la longueur active de la bobine l:

$$F = BIln.$$

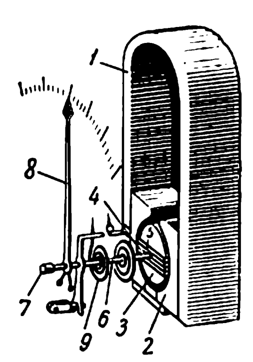


Fig. 327. Organisation d'un appareil de mesure magnéto-électrique

Les oscillations du cadre en aluminium avec l'enroulement dans le champ magnétique provoquent l'apparition dans le cadre d'un courant induit qui, d'après la loi de Lenz, tend à réduire ces oscillations en amortissant ainsi l'équipage mobile de l'appareil. La constance de l'induction dans tous les points de l'entrefer assure une proportionnalité entre le courant parcourant l'enroulement et l'angle de déviation de l'équipage mobile, de sorte que l'échelle de l'appareil est linéaire.

Les appareils magnéto-électriques sont les plus sensibles et précis parmi les appareils à lecture directe. Ils sont fabriqués comme appareils de laboratoire à plusieurs calibres, de classes de précision allant de 0,1 à 0,5 et comme appareils industriels de classes de précision de 1 à 1,5.

Les appareils magnéto-électriques présentent de nombreux avantages: grande précision, haute sensibilité, échelle linéaire, faible consommation d'énergie (0,5 à 3 W), bon amortissement et faible sensibilité aux champs magnétiques extérieurs. Ils sont largement utilisés dans les circuits à courant continu en tant que ampèremètres, voltmètres, milliampèremètres, millivoltmètres, etc.

Les défauts de ces appareils sont les suivants: prix élevé, sensibilité aux surcharges et possibilité de fonctionnement seulement dans les circuits à courant continu. En effet, si on laisse passer par l'enroulement un courant alternatif, l'équipage mobile de l'appareil devrait dévier tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, suivant la fréquence du courant. Mais étant donné qu'il possède une certaine inertie, l'équipage mobile ne pourra pas suivre les variations rapides du courant dans la bobine, de sorte que l'aiguille de l'appareil restera immobile. Pour la mesure de faibles valeurs des charges, des intensités et des tensions on utilise des galvanomètres employés surtout pour les mesures par la méthode de zéro lorsqu'il faut déterminer l'absence du courant dans telle ou telle partie du montage de mesure. Pour les mesures en courant continu on emploie presque exclusivement des galvanomètres magnéto-électriques.

Le principe et l'organisation des galvanomètres magnéto-électriques ne diffèrent guère de ceux des autres appareils de ce système, mais lors de la construction des galvanomètres on prend des mesures pour diminuer le poids de l'équipage mobile et le frottement. La bobine (le cadre) des galvanomètres comportant un grand nombre de spires est enroulée en fil isolé et imprégnée de vernis pour augmenter sa rigidité. Le cadre est muni de spirales sans couple de torsion, servant à amener le courant.

Dans les galvanomètres de faible sensibilité (les microampèremètres) l'équipage mobile est fixé sur des axes et pivots, tandis que dans les galvanomètres de haute sensibilité le cadre est suspendu sur de longs fils en bronze phosphoreux. Le cadre des galvanomètres de haute sensibilité est muni d'un miroir. Un rayon lumineux est dirigé par une source de lumière spéciale sur le miroir et, après réflexion, arrive sur l'échelle située à une certaine distance du galvanomètre.

Les galvanomètres peuvent mesurer directement des intensités de 10^{-6} à 10^{-12} A.

§ 163. APPAREILS FERROMAGNÉTIQUES

Les appareils ferromagnétiques utilisent l'interaction du courant d'une bobine et du champ magnétique d'un noyau mobile en matériau ferromagnétique. Selon leur construction les appareils de ce système se classent

en deux types: appareils à bobine plane et appareils à bobine ronde. Examinons l'organisation des appareils du premier type (fig. 328).

L'enroulement de l'appareil est formé par une bobine plane *1* avec fente. L'enroulement de la bobine dans les voltmètres est en fil fin de cuivre (0,05 à 0,1 mm de diamètre)

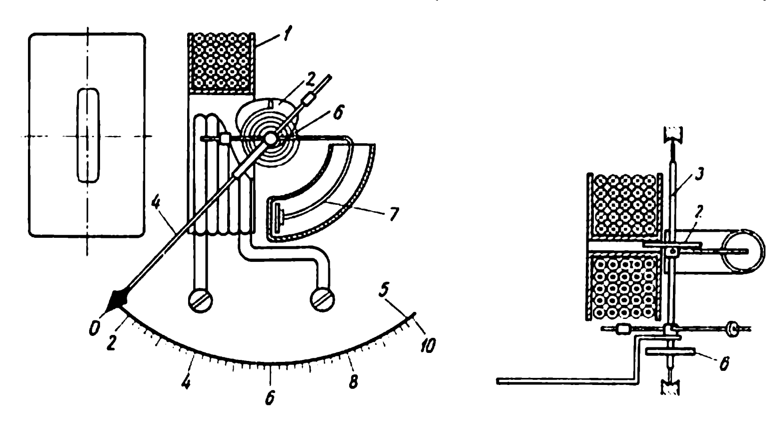


Fig. 328. Organisation d'un appareil ferromagnétique à bobine plane

à grand nombre de spires (2000 à 10 000). L'enroulement des ampèremètres prévus pour des courants ne dépassant pas 30 A comporte un petit nombre de spires en gros fil. Pour des courants jusqu'à 200 A, l'enroulement est en ruban de cuivre. Il est réalisé sous forme d'une spire pour des courants de 300 à 500 A. L'autre partie importante de l'appareil est un noyau en matériau ferromagnétique (par exemple, en permalloy) réalisé sous forme d'une lamelle *2* fixée de façon excentrique sur l'axe *3* de l'appareil. Lorsque le courant passe par les spires de la bobine, un champ magnétique y apparaît et attire le noyau dans la fente de la bobine d'autant plus que le courant traversant les spires de la bobine est plus grand. L'aiguille *4* fixée sur l'axe dévie sur l'échelle *5*. Le couple antagoniste est créé par un ressort spiral *6* dont une extrémité est liée à l'axe et l'autre à la partie fixe de l'appareil. Les appareils ferromagnétiques sont généralement dotés d'amortisseurs à air *7*. Le piston de l'amortisseur est fixé sur l'axe à l'aide d'un fil métallique; en se déplaçant dans un cylindre incurvé il subit la résistance de l'air, ce qui amortit le mouvement de l'ai-

guille. Plus la valeur du courant dans la bobine est grande, plus grand est l'angle de déviation de l'aiguille. Cette déviation, cependant, n'est pas proportionnelle au courant car le couple moteur agissant sur l'équipage mobile dépend du carré de l'intensité du courant. Pour cette raison, l'échelle des appareils ferromagnétiques n'est pas linéaire.

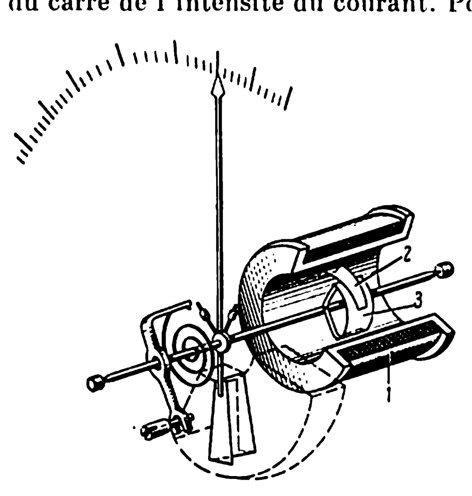


Fig. 329. Appareil ferromagnétique à bobine ronde

La figure 329 montre l'organisation d'un appareil à bobine ronde. Le courant traversant les spires de la bobine *1* crée un champ magnétique et aimante deux noyaux de fer: le noyau *2* fixé du côté interne de la bobine et le noyau *3* fixé sur l'axe de l'appareil. Les bords des noyaux qui se trouvent l'un près de l'autre sont aimantés de façon à avoir le même pôle et, pour cette raison, le noyau *3*, repoussé par le noyau *2*, fait tourner l'axe de l'appareil.

Les champs magnétiques extérieurs influent sur le fonctionnement des appareils ferromagnétiques, mais leur boîtier en fer diminue considérablement cette influence. L'inversion du sens de courant dans l'enroulement de l'appareil fait changer les pôles du noyau (ou des noyaux), de sorte que la force d'interaction ne change pas son sens. Pour cette raison, les appareils ferromagnétiques peuvent fonctionner aussi bien dans les circuits à courant continu que dans les circuits à courant alternatif. En courant alternatif, l'appareil indique la valeur efficace du courant ou de la tension. Les ampèremètres ferromagnétiques absorbent 2 à 8 W, et les voltmètres 5 à 6 W. La construction simple, le prix réduit, la forte capacité de surcharge, la possibilité d'être utilisés en courants continu et alternatif font que les appareils de ce système sont largement utilisés pour les mesures industrielles. Les défauts de l'appa-

reil sont les suivants: une faible précision, la non-linéarité de l'échelle, l'influence qu'exercent les champs magnétiques extérieurs et la fréquence sur les indications de l'appareil. Les appareils ferromagnétiques sont fabriqués surtout comme appareils de tableau de la classe de précision 1; 1,5; 2,5.

En donnant au noyau une forme spéciale et en le disposant convenablement par rapport à la bobine, on peut obtenir une certaine diminution de la non-linéarité de l'échelle.

§ 164. APPAREILS ÉLECTRODYNAMIQUES

Le principe de fonctionnement des appareils électrodynamiques repose sur l'action mutuelle des champs magnétiques de deux bobines, dont l'une est fixe et l'autre,

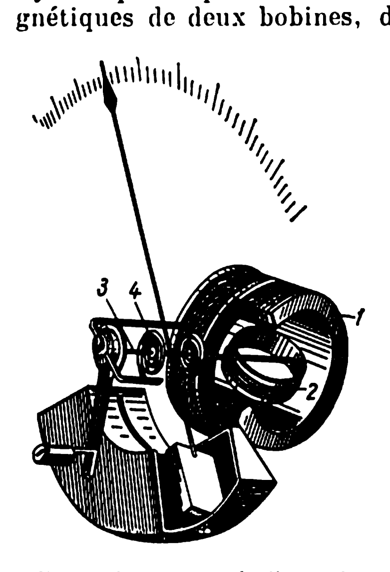


Fig. 330. Appareil électrodynamique à bobine ronde

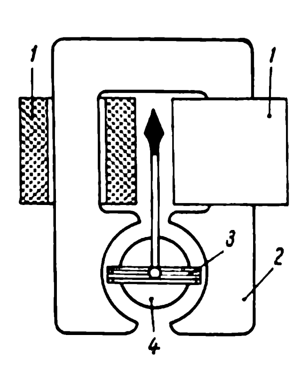


Fig. 331. Organisation schématique d'un appareil ferrodynamique

montée sur un axe, peut tourner. Sur la figure 330 est représentée l'organisation d'un appareil électrodynamique. La bobine *1* (faite ici en deux moitiés) est fixe. A la bobine mobile *2* montée sur l'axe *3* de l'appareil le courant est amené par deux ressorts spiraux *4* qui servent

en même temps à créer le couple antagoniste. Lorsqu'on fait passer un courant par les spires des deux bobines, elles créent des champs magnétiques en interaction qui tendent à faire tourner la bobine *2* de façon que son champ et celui de la bobine *1* aient le même sens. Les bobines de certains appareils sont rectangulaires, dans d'autres elles sont rondes. Le champ magnétique de chaque bobine dépend de l'intensité du courant, de sorte que la force d'interaction des deux bobines est proportionnelle au carré de l'intensité du courant. Par conséquent, l'échelle de l'appareil n'est pas linéaire. L'amortissement de ces appareils est à l'air; l'emploi d'un frein électromagnétique fausserait leurs indications. Cela s'explique par le fait que les champs magnétiques propres des bobines sont très faibles et un fort champ de l'aimant permanent d'un frein électromagnétique influerait sur le fonctionnement correct de l'appareil. Le changement simultané du sens de courant dans les deux bobines ne change pas le sens de la force d'interaction. Les appareils électrodynamiques peuvent donc être employés dans les circuits à courants continu et alternatif. Dans les circuits à courant alternatif les appareils de ce système indiquent la valeur efficace de la grandeur mesurée. La précision des appareils électrodynamiques est élevée (classe de précision de 0,2 à 0,5), et, pour cette raison, ils sont utilisés en tant qu'appareils de contrôle pour les mesures en courant alternatif. Les défauts de ces appareils sont les suivants: consommation assez grande (de 5 à 10 W pour les ampèremètres et de 7 à 15 W pour les voltmètres), sensibilité aux surcharges et influence des champs magnétiques extérieurs sur les indications des appareils en raison de leur faible champ magnétique propre. En cas de surcharge, les ressorts spiraux perdent leur élasticité et peuvent brûler.

Un autre type d'appareils électrodynamiques sont les appareils ferrodynamiques (fig. 331). Une bobine fixe *1* est enroulée sur la culasse *2* en tôle d'acier magnétique. A l'intérieur de la bobine mobile *3* est fixé un cylindre en acier *4*. La bobine mobile tourne autour d'un noyau cylindrique. L'accroissement du champ magnétique de l'appareil fait augmenter le couple moteur et diminuer l'influence des champs magnétiques extérieurs. Mais la présence du fer cause des erreurs complémentaires (par exemple, lorsque l'appareil mesure des courants alternatifs, des pertes par hystérésis et courants de Foucault ont lieu). La préci-

sion des appareils ferrodynamiques est inférieure à celle des appareils électrodynamiques. Grâce à leur grand couple moteur, les appareils de ce système sont souvent utilisés comme appareils enregistreurs. L'aiguille de ces appareils est équipée d'une plume qui s'appuie sur le ruban de papier qu'un mécanisme d'horlogerie fait avancer. La plume de l'aiguille trace sur le papier une courbe de variation du courant, de la tension, de la puissance, etc.

§ 165. APPAREILS THERMIQUES

Le principe de fonctionnement des appareils thermiques est fondé sur la dilatation d'un fil métallique réchauffé par le courant. L'allongement du fil est ensuite transformé en mouvement de rotation de l'équipage mobile de l'appareil. La figure 332 montre l'organisation d'un appareil thermique. Entre les points A_1 et A_2 est tendu un fil métallique *1* de 100 à 160 mm de longueur et de 0,03 à 0,05 mm de diamètre fait en alliage de platine et d'iridium ou de platine et d'argent. Au point B, le fil en platine-iridium est tendu par un autre fil métallique *2* (un pont) dont l'autre bout est fixé au point C. Au point D le pont est tendu par un fil de soie fin *3* enroulé sur la poulie *4*. L'autre bout du fil de soie est fixé à un ressort en ruban d'acier *5*. En traversant le fil de platine-iridium le courant le réchauffe (dans certains appareils sa température atteint 300 °C). Par suite de l'allongement du fil *1*, le fil métallique *2*, le fil de soie *3* et le ressort *5* se déplacent. La position de certaines parties de l'appareil après l'allongement du fil en platine-iridium est montrée en pointillé sur la figure 332. La quantité de chaleur dégagée par le courant est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et à la résistance du fil (I^2r). Si l'on ne tient pas compte d'une certaine

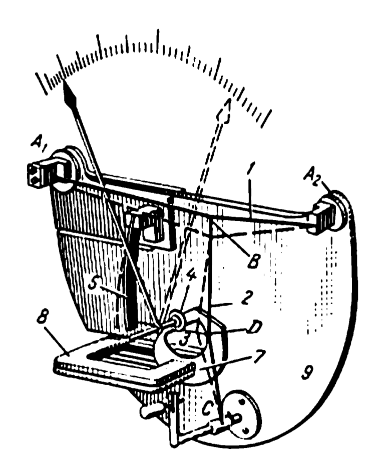


Fig. 332. Organisation d'un appareil thermique

variation de la résistance du fil réchauffé, on peut admettre que l'échauffement du fil est proportionnel au carré de l intensité du courant. Par conséquent, l'échelle d'un appareil thermique n'est pas linéaire. Un appareil thermique peut être utilisé dans les circuits à courant continu et à courant alternatif. Dans le dernier cas il indique la valeur efficace de la grandeur mesurée.

Puisque les champs magnétiques ne participent pas au fonctionnement de l'appareil, les champs magnétiques extérieurs n'influent pas sur ses indications. L'absence de fer et l'inductance minime du fil, qui est très court, assurent l'indépendance des indications d'un appareil thermique des variations de la fréquence du courant dans de larges limites. C'est la raison pour laquelle les appareils de ce type sont très utilisés pour les mesures dans les circuits de haute fréquence. Dans la plupart des cas l'amortissement de l'appareil thermique est électromagnétique. Ainsi, sur l'axe de l'appareil se trouve une plaque en aluminium *7* située entre les pôles d'un puissant aimant en fer à cheval *8*. Lorsque l'axe tourne, la plaque *7* coupe le champ magnétique et des courants de Foucault y sont induits qui, en interaction avec le champ de l'aimant, amortissent rapidement les oscillations de l'équipage mobile de l'appareil.

Mais les appareils thermiques présentent plusieurs défauts. Parmi les plus graves est la variation des indications de l'appareil en fonction de la température ambiante. Pour diminuer cette influence, la plaque *9*, sur laquelle sont fixées toutes les pièces de l'appareil, est faite en deux métaux différents ayant le même coefficient de dilatation thermique que le fil en platine-iridium. Il en résulte que sous l'action de la température ambiante la plaque et le fil se dilatent de la même façon, de sorte que la tension du fil reste inchangée. Il existe d'autres moyens de compensation de l'influence de la température ambiante. Les appareils thermiques sont sensibles aux surcharges, car dans ce cas leur fil grille ou reçoit une déformation résiduelle et on est alors obligé d'étalonner de nouveau l'appareil.

La consommation de puissance est très grande et atteint dans les ampèremètres de 5 A 1 à 3 W et dans les voltmètres de 150 V 20 à 30 W. La précision des appareils n'est pas élevée et les écarts atteignent 1,5 à 2 %. Il est à noter qu'actuellement les appareils thermiques ne sont plus produits et qu'ils ont été remplacés par les appareils à thermocouple

à convertisseurs placés dans'air ou dans le vide. Ces derniers présentent plusieurs avantages en comparaison avec les appareils thermiques (voir § 167).

§ 166. APPAREILS DE MESURE À INDUCTION

Ce système est caractérisé par l'emploi de plusieurs bobines fixes alimentées par un courant alternatif. Ces bobines créent un champ tournant ou progressif qui induit des courants dans l'équipage mobile de l'appareil. Il en résulte le déplacement de l'équipage mobile.

Les appareils à induction sont utilisés seulement en courant alternatif comme wattmètres et compteurs d'énergie électrique (plus rarement, comme ampèremètres et voltmètres). Examinons le principe de fonctionnement des appareils à induction. Remarquons d'abord qu'à l'heure actuelle les wattmètres à induction ne sont plus fabriqués et qu'ils ont été remplacés par les wattmètres ferrodynamiques dont les indications dépendent moins de la température et de la fréquence. La figure 333 représente un électro-aimant *1* et un disque en aluminium *2*, ce dernier pouvant tourner sur son axe. Le courant alternatif circulant dans l'enroulement de l'électro-aimant crée un flux magnétique variable qui induit une F.É.M. dans le disque d'aluminium.

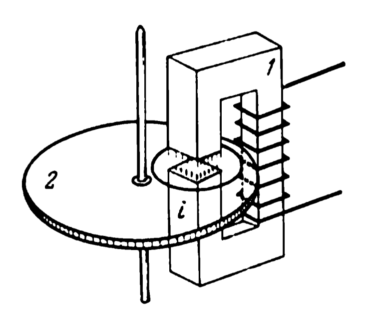


Fig. 333. Induction des courants de Foucault dans le disque par un flux magnétique alternatif

Dans le § 86 nous avons vu que la F.É.M. induite est déphasée en arrière de 90° par rapport au flux magnétique Φ_1 qui crée cette F.É.M. Le courant i_1 produit dans le disque d'aluminium est en phase avec la F.É.M. et retarde de 90° sur le flux magnétique Φ_1. Le courant i_1, en interaction avec le flux magnétique Φ_1, peut créer une force sous l'action de laquelle le disque tourne. Cependant, dans le cas considéré, cela n'arrivera pas (voir fig. 334, *a*).

La force d'interaction F proportionnelle au courant i_1 et au flux magnétique Φ_1 change son sens quatre fois pendant une période empêchant le disque de tourner. Mais

si on dispose un autre électro-aimant au-dessus du disque, son flux magnétique Φ_2 créera dans le disque un courant

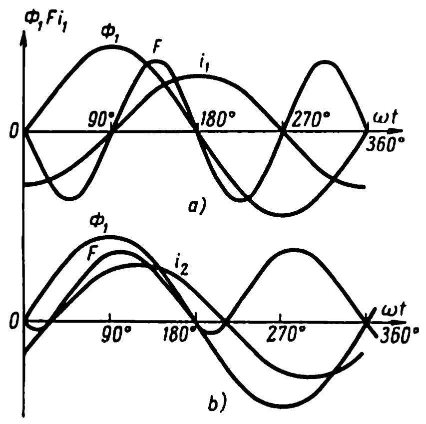


Fig. 334. Courbes des flux magnétiques et des courants de Foucault induits dans le disque

induit i_2. Maintenant faisons de sorte que les flux Φ_1 et Φ_2 soient déphasés; alors les courants i_1 et i_2 seront également déphasés et l'angle entre Φ_1 et i_2 ou entre Φ_2 et i_1 ne sera plus égal à 90°. On voit d'après la figure 334, *b* que dans ce cas la force d'interaction sera dominante dans un sens et, par conséquent, le disque se mettra à tourner. Si les flux Φ_1 et Φ_2 sont déphasés de 90°, la force agissant sur le disque est maximale.

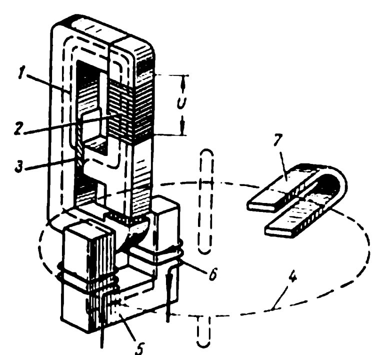


Fig. 335. Organisation schématique d'un appareil à induction à champ progressif

Les appareils à induction se divisent en deux groupes: appareils à champ progressif et appareils à champ tournant.

Examinons l'organisation et le fonctionnement d'un appareil à induction à champ progressif (fig. 335).

Sur le circuit magnétique *1* est située la bobine *2* comprenant un grand nombre de spires en fil fin. Une grande

partie du flux créé par cette bobine passe par le shunt magnétique *3* tandis que le reste traverse le disque d'aluminium *4*. Sous le disque se trouve un circuit magnétique en forme de U *5* sur lequel est placé l'enroulement *6* divisé en deux parties et comportant plusieurs spires en gros fil. Le flux magnétique dû à cet enroulement traverse le disque deux

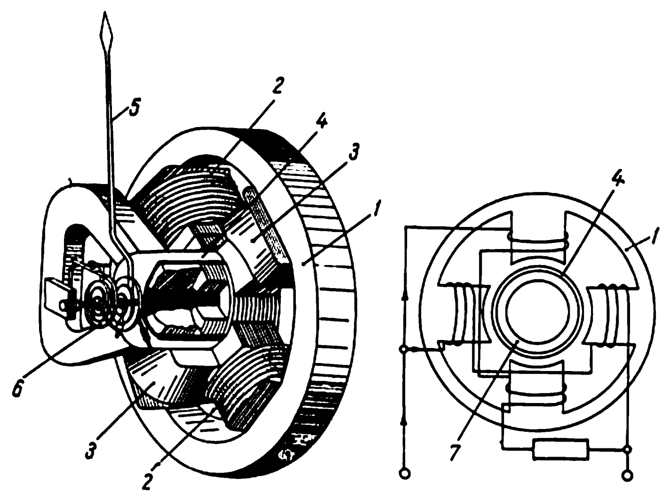


Fig. 336. Appareil à induction à champ tournant

fois. Deux flux magnétiques déphasés l'un par rapport à l'autre induisent dans le disque d'aluminium des courants de Foucault qui en interaction avec le flux créent un couple moteur sous l'action duquel le disque se met en mouvement.

L'amortissement du disque est assuré par un aimant en fer à cheval *7*.

La figure 336 montre l'organisation d'un appareil à induction à champ magnétique tournant. Sur le circuit magnétique *1* fait en tôles d'acier magnétique on dispose deux enroulements. L'enroulement *2* est situé sur deux pièces polaires opposées et l'enroulement *3* est placé sur deux autres pièces polaires également opposées. Entre les pôles se trouve un cylindre en aluminium *4* monté sur un axe. Sur l'axe sont également fixés l'aiguille *5* et le ressort spiral *6*. A l'intérieur du cylindre en aluminium se trouve un noyau cylindrique en acier *7* destiné à diminuer la réluctance. Lorsqu'on fait passer par les enroulements *2* et *3* un courant alternatif, ils créent deux flux magnétiques.

Nous avons dit plus haut que pour obtenir un couple moteur maximal il faut créer entre les flux magnétiques un déphasage de 90°. On y arrive en enroulant une paire de bobines avec un petit nombre de spires de gros fil. Un tel enroulement ne présente pratiquement qu'une résistance ohmique de sorte que le courant y est en phase avec la tension. L'autre paire de bobines comporte un grand nombre de spires en fil fin, ce qui provoque un déphasage entre le courant et la tension proche de 90°. Le déphasage est dû à la grande réactance d'induction de cette paire de bobines. Le déphasage nécessaire entre les flux peut être obtenu par le choix convenable et le branchement de résistances ohmiques et de réactances d'induction complémentaires. Le champ magnétique se déplaçant suivant la circonférence de l'entrefer tourne ainsi à une vitesse déterminée par rapport à l'axe de l'équipage mobile de l'appareil. En coupant le cylindre en aluminium *4* ce champ induit dans le cylindre des courants de Foucault qui en interaction avec le champ magnétique font tourner le cylindre dans le sens de rotation du champ. L'examen des appareils à induction à champ tournant montre que leur principe de fonctionnement est le même que celui des moteurs asynchrones diphasés à rotor en court-circuit.

L'amortissement de l'appareil est réalisé par les courants de Foucault induits dans la partie supérieure du cylindre en aluminium lorsqu'il se déplace dans le champ de deux aimants permanents (un de ces aimants n'est pas indiqué sur le dessin). Le champ magnétique extérieur n'influe pas pratiquement sur le fonctionnement des appareils à induction, car ces derniers possèdent un fort champ magnétique propre. Les appareils à induction présentent les avantages suivants: construction robuste, capacité de surcharge, fiabilité. Leurs défauts sont: possibilité d'être utilisés seulement en courant alternatif, échelle non linéaire, variation des indications en fonction de la température et de la fréquence, faible précision (1,0 à 1,5 %). La consommation de ces appareils est de 2 à 4 W.

§ 167. APPAREILS À THERMOCOUPLE

Le principe de fonctionnement de ces appareils est basé sur l'utilisation de la force électromotrice qui apparaît dans un circuit comprenant différents conducteurs lorsque

l'endroit de connexion de ces conducteurs a une température qui diffère de celle de l'autre partie du circuit.

La figure 337 donne le schéma d'un appareil à thermocouple.

Le courant à mesurer passe par un fil métallique *1* auquel sont soudés deux conducteurs différents *2* (par exemple, de fer et de constantan). Les bouts libres des conducteurs *2* sont réunis aux planchettes métalliques *3* qui sont de bons conducteurs de la chaleur. Aux planchettes est réuni un appareil de mesure magnéto-électrique *4*.

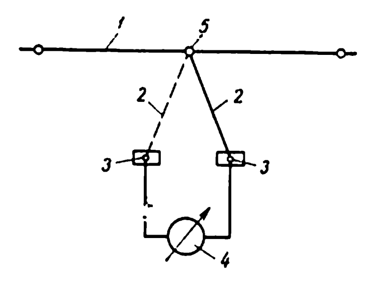


Fig. 337. Organisation schématique d'un appareil à thermocouple

Quand il est parcouru par le courant, le fil *1* et l'endroit de soudure avec les conducteurs *2* (point *5*) s'échauffent. Le point *5* est la soudure chaude du thermocouple, tandis que les planchettes *3* sont les soudures froides. Par suite de la différence de température dans le circuit fermé une force thermo-électromotrice apparaît qui engendre un courant dans ce circuit. Le sens de ce courant est toujours le même, quel que soit le sens du courant mesuré.

Selon la loi de Joule-Lenz, la quantité de chaleur dégagée dans la soudure chaude du thermocouple est proportionnelle au carré de l'intensité du courant. Il s'ensuit que l'échelle de l'appareil magnéto-électrique utilisé dans ce système n'est pas linéaire. Pour obtenir une échelle linéaire, on fait de sorte que le champ magnétique de l'appareil magnéto-électique soit non homogène. La force thermo-électromotrice d'un thermocouple ne dépasse pas 15 mV, ce qui exige l'emploi d'un appareil magnéto-électrique très sensible. Pour augmenter la valeur de la force thermo-électromotrice on réunit en série plusieurs thermocouples pour former une batterie.

Le thermocouple des appareils très sensibles est placé dans le vide.

Les appareils de ce système sont sensibles aux surcharges: même avec une surcharge de courte durée atteignant 10 % le fil peut griller. La sensibilité de ces appareils est assez grande, ce qui permet de les fabriquer dans les clas-

ses de précision 0,5 et 1. Les appareils à thermocouple sont utilisés surtout pour mesurer de faibles valeurs de courant alternatif dans les circuits à fréquence élevée et à haute fréquence.

§ 168. APPAREILS À REDRESSEUR

Les appareils à redresseur comportent un appareil magnéto-électrique et un ou plusieurs redresseurs (détecteurs) à semi-conducteurs réunis dans un seul montage. On utilise généralement comme redresseur (détecteur) des redresseurs à l'oxyde de cuivre.

La figure 338 donne les schémas de connexion des redresseurs avec un appareil magnéto-électrique. Les appareils

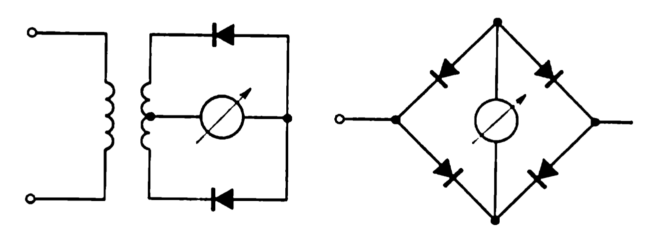


Fig. 338. Schéma de connexion d'un redresseur avec un appareil magnéto-électrique

de ce système sont employés pour mesurer des faibles courants alternatifs et tensions alternatives (à partir de quelques dixièmes de milliampère ou quelques dixièmes de volt) ainsi que pour mesurer les circuits à fréquences élevées (50 à 2000 Hz). On utilise surtout des appareils universels: ampèrevoltmètres à plusieurs calibres pour courants continu et alternatif. La précision des appareils à redresseur n'est pas élevée: ils sont généralement de la classe de précision 2,5.

§ 169. APPAREILS À LAMES VIBRANTES

Les appareils de ce système se caractérisent par l'emploi de plusieurs lames accordées sur différentes périodes d'oscillations propres et permettant de mesurer la fréquence grâce à la résonance de la fréquence de la lame vibrante avec la fréquence à mesurer. Ces appareils sont utilisés uniquement

comme fréquencemètres. La figure 339 montre l'organisation d'un fréquencemètre à lames vibrantes.

Un électro-aimant dont l'enroulement *1* est alimenté par le secteur alternatif est placé au-dessus d'une plaque (d'une armature) en acier *2* fixée sur une tige métallique *3*. Sur cette tige sont disposées plusieurs lames *4* accordées sur différentes périodes d'oscillations propres. La tige est fixée aux ressorts plans *5*. Les extrémités des lamelles sont pliées et peintes en blanc. Lorsque l'enroulement de l'électro-aimant est parcouru par un courant alternatif, un flux magnétique alternatif apparaît, lequel agissant sur l'armature *2* la fait vibrer. Ce mouvement vibratoire est transmis à la tige *3* et aux lames *4*.

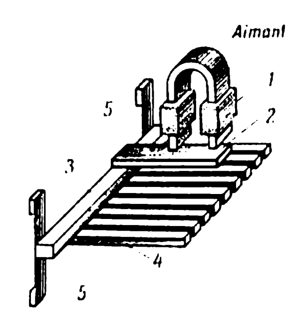


Fig. 339. Schéma d'organisation d'un fréquencemètre

Cependant, les lames ont des amplitudes d'oscillations différentes. La lame dont la période d'oscillations propres coïncide avec la fréquence de variation du flux magnétique

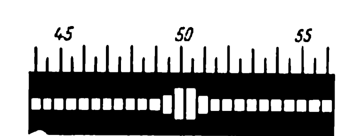


Fig. 340. Partie de l'échelle d'un fréquencemètre à lames vibrantes

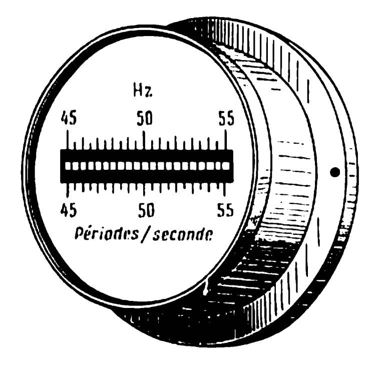


Fig. 341. Vue d'ensemble d'un fréquencemètre à lames vibrantes

ou, autrement dit, qui coïncide avec la fréquence du courant alternatif, oscille avec la plus grande amplitude. Dans l'échancrure rectangulaire de l'échelle du fréquencemètre on voit les bouts peints en blanc des lames. Contre chaque la-

Système	Symbole	
	sans écran	avec écran magnétique
Magnéto-électrique, avec force résistante mécanique		
Idem, sans force résistante		
Ferromagnétique, avec force résistante		
Idem, sans force résistante		
Electrodynamique, avec force résistante		
Idem, sans force résistante		
Ferrodynamique, avec force résistante		
Idem, sans force résistante		
A induction, avec force résistante		—
Idem, sans force résistante		—
Thermique		—
A thermocouple		—
A redresseur		—
Electronique		—
Electrostatique		—
A lames vibrantes		—

Désignation	Symbole
Courant continu	—
Courant alternatif	~
Courant continu et alternatif	≂
Courant triphasé:	
Charge équilibrée	
Charge non équilibrée	
Système à quatre fils	
Fréquence 50 Hz	~50
Tension d'épreuve diélectrique 2 kV	2 kV
Position verticale du cadran	↑
Position horizontale du cadran	→
Position inclinée du cadran (par exemple: 60°)	∠60°
Classe de précision (par exemple: 0,2)	0,2

Fig. 342. Symboles et indications portés sur les cadrans des appareils de mesure électriques

me de l'échelle de l'appareil est indiqué un chiffre qui correspond à la fréquence du courant en Hz. Lorsque l'appareil fonctionne, le bout de la lame vibrant en résonance forme une bande claire.

Une partie de l'échelle d'un fréquencemètre de ce type est montrée sur la figure 340.

La vue d'ensemble d'un fréquencemètre à lames vibrantes est montrée sur la figure 341.

L'enroulement de l'électro-aimant du fréquencemètre comprend un grand nombre de spires en fil fin. On le branche sur le réseau de la même manière qu'un enroulement de voltmètre, c'est-à-dire parallèlement.

Sur la figure 342 sont donnés les symboles et les indications portés sur les cadrans des appareils.

Il est à noter qu'à l'heure actuelle les fréquencemètres à lames vibrantes ont été remplacés par les fréquencemètres à aiguille ayant une échelle continue.

§ 170. TRANSFORMATEURS DE MESURE

Dans les réseaux à courant alternatif, afin de séparer les appareils de mesure des fils de haute tension, aussi bien pour des raisons de sécurité que pour étendre les limites de mesures des appareils, on utilise des transformateurs de tension et des transformateurs de courant.

Afin d'assurer une haute précision des mesures, le rapport de transformation des transformateurs de tension (de courant) doit être constant. En outre, l'angle entre les vecteurs des tensions (courants) primaire et secondaire dans ces transformateurs doit être également constant et égal à 180°. Cette dernière condition est indispensable lorsqu'on branche, par l'intermédiaire des transformateurs, des appareils dont les indications dépendent du déphasage entre la tension et le courant du réseau (wattmètres, compteurs, phasemètres, etc.).

Toutefois, en pratique les transformateurs de tension (de courant) ont *une erreur de rapport de transformation et une erreur de phase.*

On appelle *rapport de transformation nominal* d'un transformateur de tension k_t (de courant k_c) le rapport de la valeur nominale de la tension (du courant) primaire à la valeur nominale de la tension (du courant) secondaire.

On appelle erreur relative de rapport de transformation la différence entre le produit de la tension (du courant) secondaire par le rapport de transformation et la valeur réelle de la tension (du courant) primaire, rapportée à la valeur réelle de la tension (du courant) primaire:

$$\gamma_U = \frac{k_t U_2 - U_1}{U_1}; \quad \gamma_I = \frac{k_t I_2 - I_1}{I_1}.$$

On appelle erreur de phase d'un transformateur de tension (de courant) l'angle entre le vecteur de la tension (du courant) primaire et le vecteur de la tension (du courant) secondaire, ce dernier tourné de 180°.

L'erreur de rapport de transformation et l'erreur de phase augmentent avec la charge. Pour cette raison, les transformateurs ne doivent pas être chargés au-dessus de la puissance nominale (indiquée dans la fiche technique ou sur la plaque signalétique).

L'erreur de rapport de transformation des transformateurs fabriqués en U.R.S.S., dans les limites de la puissance nominale, ne dépasse pas ± 1 %. L'erreur de phase ne dépasse pas $\pm 45'$.

§ 171. TRANSFORMATEURS DE TENSION

Les enroulements primaire et secondaire d'un transformateur de tension sont en fil de cuivre isolé et sont enroulés sur un noyau fermé en tôles d'acier à transformateurs. Un transformateur destiné à alimenter des lampes à incandescence, des moteurs électriques, etc. (transformateur de puissance) ne diffère pas par sa construction d'un transformateur de tension servant à alimenter les circuits de tension des appareils de mesures.

Le rapport de transformation nominal est généralement indiqué dans la fiche du transformateur sous forme d'une fraction dont le numérateur indique la tension de l'enroulement primaire et le dénominateur indique la tension de l'enroulement secondaire. Ainsi, 6000/100 signifie que k_t dans ce cas est égal à 60.

Selon la Norme soviétique, tous les transformateurs de tension fabriqués en U.R.S.S. ont une tension secondaire de 100 V. Les puissances nominales des transformateurs de tension sont comprises entre 200 et 2000 VA.

Lorsqu'on connaît le rapport de transformation du transformateur et la tension aux bornes de l'enroulement secondaire on peut déterminer la tension primaire:

$$U_1 = k_t U_2.$$

Dans les appareils destinés à fonctionner toujours avec le même transformateur, l'échelle est graduée en valeurs de la tension primaire, compte tenu du rapport de transformation.

La puissance nominale d'un transformateur est indiquée sur la plaque signalétique. Afin d'éviter des erreurs lors des mesures, le nombre d'appareils branchés sur le transformateur doit être tel que la puissance totale absorbée ne dépasse pas la puissance nominale du transformateur.

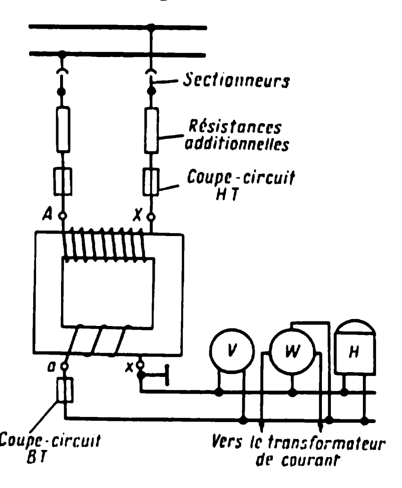


Fig. 343. Schéma de branchement d'un transformateur de tension monophasé

L'industrie livre des transformateurs de tension monophasés et triphasés. La figure 343 montre le schéma de branchement d'un transformateur de tension monophasé. Pour protéger le transformateur contre les surcharges et les courts-circuits qui peuvent survenir dans les circuits des appareils de mesure, son enroulement secondaire comporte un coupe-circuit de basse tension. En cas de claquage de l'isolation de l'enroulement haute tension, le noyau et l'enroulement secondaire peuvent se trouver à un potentiel élevé. Pour prévenir cela, l'enroulement secondaire et les pièces métalliques du transformateur sont mis à la terre. On ne place pas de coupe-circuit dans la sortie de l'enroulement secondaire mise à la terre. Pour protéger le réseau de haute tension contre les conséquences d'un court-circuit dans l'enroulement primaire du transformateur, cet enroulement est branché sur le réseau par l'intermédiaire de coupe-circuit de haute tension. Afin de faciliter le fonctionnement

des coupe-circuit de haute tension on branche en série avec ces derniers des résistances de limitation de courant qui diminuent l'intensité de courant de court-circuit, en assurant ainsi un bon fonctionnement des coupe-circuit. Pour

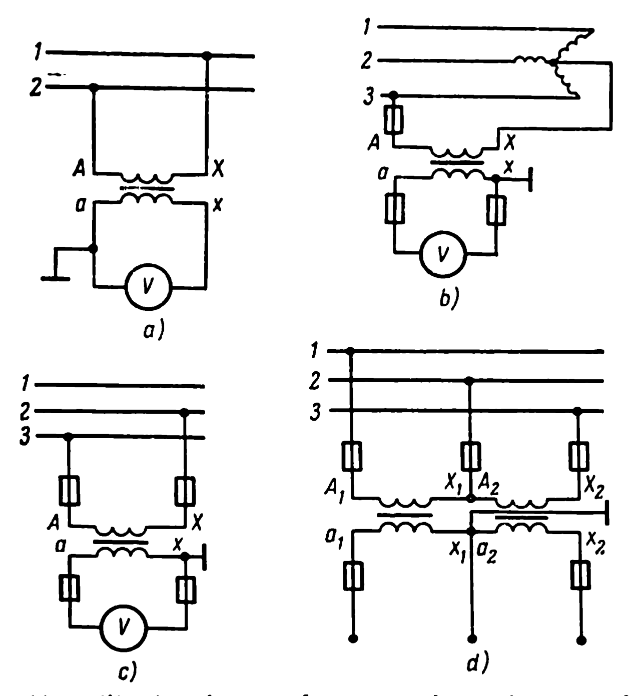


Fig. 344. Utilisation des transformateurs de tension monophasés:
a — mesure de la tension dans un réseau à courant monophasé; *b* — mesure de la tension simple dans le réseau à courant triphasé; *c* — mesure de la tension composée dans un réseau à courant triphasé; *d* — branchement de deux transformateurs de tension suivant le schéma « triangle ouvert »

débrancher un transformateur du réseau on utilise des sectionneurs.

Les transformateurs de tension se divisent en quatre classes de précision : 0,2 ; 0,5 ; 1 et 3. Les chiffres désignent l'erreur en tension exprimée en pour cent. Pour des tensions jusqu'à 3 kV, les transformateurs sont à refroidissement par l'air et pour les tensions supérieures à 6 kV ils sont à refroidissement par l'huile.

Les transformateurs de tension sont utilisés pour mesurer la tension dans les réseaux de haute tension ; pour la con-

nexion des relais de tension, des bobines à manque de tension, des disjoncteurs, des fréquencemètres, des lampes de signalisation; pour l'alimentation des enroulements dérivation des wattmètres, des compteurs, des phasemètres;

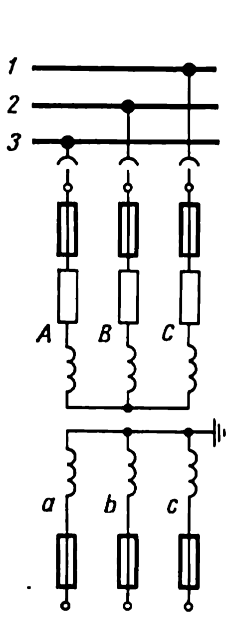
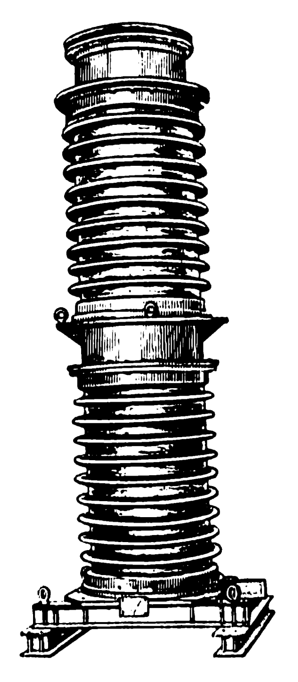


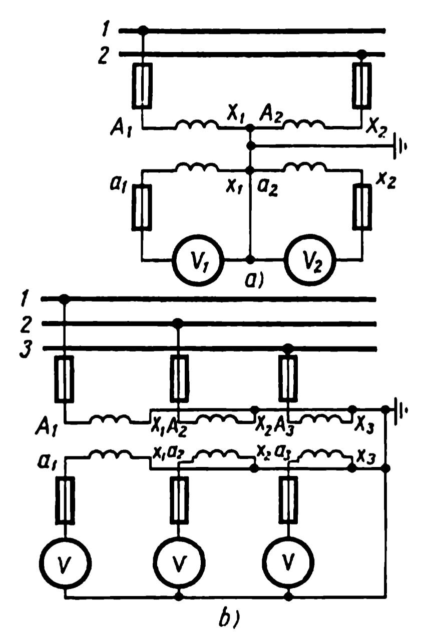
Fig. 345. Schéma de branchement d'un transformateur de tension triphasé


Fig. 346. Transformateur de tension НКФ-220

pour le contrôle de l'isolement. La figure 344 montre les divers modes d'utilisation des transformateurs de tension: *a* — mesure de la tension dans un réseau à courant monophasé; *b* — mesure de la tension simple dans un réseau triphasé; *c* — mesure de la tension composée dans un réseau triphasé; *d* — branchement de deux transformateurs de tension monophasés suivant le montage « triangle ouvert », permettant de mesurer toutes les trois tensions composées. Dans les réseaux triphasés on utilise également des transformateurs de tension triphasés. Le schéma de branchement d'un tel transformateur est représenté par la figure 345.

La figure 346 montre un transformateur de tension monophasé НКФ-220 (hauteur: 3,75 m, poids total: 2640 kg).

La figure 347 montre l'emploi des transformateurs de tension pour le contrôle de l'isolement du réseau: *a* — contrôle de l'isolement d'une ligne monophasée par rapport à la terre. Lorsque l'isolement est en bon état les deux



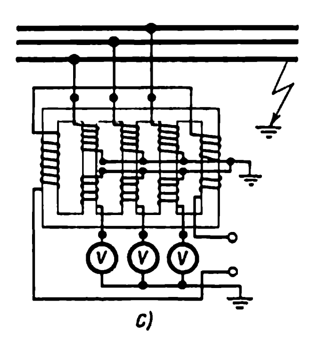


Fig. 347. Utilisation des transformateurs de tension pour le contrôle de l'isolement du réseau:

a — contrôle de l'isolement d'une ligne monophasée; *b* — contrôle de l'isolement d'une ligne à courant triphasé; *c* — transformateur triphasé à cinq colonnes

voltmètres indiquent la moitié de la tension du réseau. Si un fil est mis à la terre, le voltmètre branché entre ce fil et la terre reste au zéro, tandis que l'autre voltmètre indique la tension totale du réseau; *b* — contrôle de l'état de l'isolement d'un réseau triphasé. Lorsque l'isolation est en bon état, chaque voltmètre indique la tension simple. Si un fil est mis à la terre, le voltmètre connecté à ce fil indique une tension nulle, tandis que les autres indiquent la tension composée. Si l'on utilise à cette fin un transformateur triphasé à trois colonnes avec point neutre mis à la terre du côté haute tension, dans le cas d'une mise à la terre accidentelle dans le réseau, un enroulement du transformateur sera court-circuité et les deux autres induiront dans le premier enroulement un fort courant qui peut

mettre le transformateur hors service. Pour prévenir cela, les transformateurs triphasés à trois colonnes sont fabriqués sans point neutre sorti du côté haute tension; *c*— transformateur triphasé à cinq colonnes utilisé dans les réseaux triphasés pour le contrôle de l'isolement. Lorsque le réseau est en bon état, la somme géométrique des flux magnétiques est nulle et le flux ne circule pas dans les colonnes extrêmes. Si un des fils du réseau de haute tension est mis à la terre, l'enroulement correspondant du transformateur sera fermé, les flux magnétiques des autres phases se fermeront par les colonnes extrêmes et induiront une F.É.M. dans l'enroulement auxiliaire. Les transformateurs de tension se subdivisent en trois groupes:

1. Transformateurs secs des types НОС-0,5, НОС-3, НТС-0,5 et НТСН-0,5.
2. Transformateurs dans l'huile des types НОМ-10; НОМ-35; НТМК-6; НТМК-10; НТМИ-6 et НТМИ-10.
3. Transformateurs à bain d'huile en cascade des types НКФ-110, НКФ-220.

Les lettres utilisées pour la désignation des transformateurs de tension signifient: НОС — transformateur de tension monophasé sec; НТС — transformateur de tension triphasé sec; НТСИ — transformateur de tension triphasé à trois enroulements à cinq colonnes, sec, pour le contrôle de l'isolement; НОМ — transformateur de tension monophasé à bain d'huile; НТМК — transformateur de tension triphasé à bain d'huile avec enroulement de compensation; НТМИ — transformateur de tension triphasé à trois enroulements, à bain d'huile, à cinq colonnes, pour le contrôle de l'isolement; НКФ — transformateur de tension monophasé en cascade dans une enveloppe de porcelaine. Le chiffre qui suit les lettres indique la haute tension nominale en kV pour le type donné de transformateur.

Les transformateurs de tension sont prévus pour être installés à l'intérieur, sauf les transformateurs НОМ-35, НКФ-110 et НКФ-220 qui sont destinés à être installés à l'extérieur.

Dans les transformateurs triphasés à trois colonnes НТМК les spires principales d'une phase donnée de l'enroulement primaire sont connectées à un petit nombre de spires de compensation d'une autre phase. Une telle connexion permet de réduire (de compenser) l'erreur de phase du transformateur et d'augmenter ainsi sa précision. Les

transformateurs en cascade comportent chacun plusieurs transformateurs où l'enroulement secondaire du transformateur précédent fournit la tension appliquée à l'enroulement primaire du transformateur suivant.

§ 172. TRANSFORMATEURS DE COURANT

Les transformateurs de courant servent à transformer un courant de grande intensité en un courant de faible intensité. La figure 348 montre l'organisation et le schéma de branchement d'un transformateur de courant.

Sur un noyau en tôles d'acier à transformateur sont bobinés deux enroulements: l'enroulement primaire comprenant un nombre réduit de spires et branché en série dans le circuit traversé par le courant à mesurer et l'enroulement secondaire comprenant un grand nombre de spires auquel sont branchés les appareils de mesure. Lorsqu'on mesure les courants dans les réseaux de haute tension, les appareils de mesure sont séparés et isolés des fils de haute tension. L'enroulement secondaire d'un transformateur de courant est généralement prévu pour un courant de 5 A (parfois pour un courant de 10 A), les courants primaires nominaux peuvent être compris entre 5 et 15 000 A.

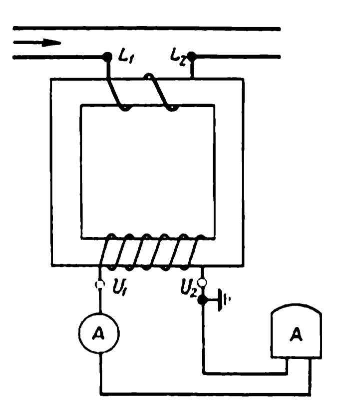


Fig. 348. Schéma de branchement d'un transformateur de courant

Le rapport du courant primaire au courant secondaire, approximativement égal à l'inverse du rapport des spires des enroulements, est appelé *rapport de transformation du transformateur de courant*. Le rapport de transformation nominal est indiqué dans la fiche du transformateur sous forme d'une fraction dont le numérateur indique le courant primaire nominal et le dénominateur indique le courant secondaire nominal. Ainsi, 150/5 A signifie que $k_c = 30$.

Si on connaît le courant secondaire I_2 et le rapport de transformation k_c, on peut déterminer le courant primaire I_1:

$$I_1 = k_c I_2.$$

Les appareils fonctionnant toujours avec le même transformateur sont gradués en valeur du courant primaire, compte tenu du rapport de transformation. L'emploi d'un transformateur de courant introduit des erreurs inévitables (jusqu'à ±1 %).

Rappelons au lecteur que dans un transformateur de tension le flux magnétique résultant reste presque constant quel que soit le régime de fonctionnement. Mais si dans un transformateur de courant on augmente la résistance du circuit de l'enroulement secondaire, le courant primaire étant constant, cela fait diminuer le courant I_2 et le flux Φ_2, ce qui à son tour provoque un accroissement du flux résultant Φ. Lorsqu'on ouvre l'enroulement secondaire ($I_2 = 0$, $\Phi_2 = 0$), le flux magnétique résultant dans le noyau du transformateur augmente et atteint la valeur Φ_1. Il s'ensuit que le noyau qui est prévu pour un flux résultant Φ est surchauffé, ce qui peut provoquer la mise hors service du transformateur. De plus, l'augmentation du flux magnétique par rapport au flux normal provoque l'induction dans l'enroulement secondaire d'une F.É.M. considérable (500 à 1000 V) qui présente un danger d'électrocution pour le personnel si quelqu'un touche accidentellement les bornes de cet enroulement. Pour cette raison, lorsque le courant circule dans l'enroulement primaire, il est strictement interdit d'ouvrir l'enroulement secondaire; il doit toujours être fermé par un appareil ou court-circuité.

Lorsque la résistance du circuit secondaire augmente, le flux magnétique résultant croît, le noyau du transformateur est saturé, ce qui fait augmenter l'erreur du transformateur.

Lorsqu'on branche des appareils de mesure sur un transformateur de courant il faut veiller à ce que la puissance absorbée par ces appareils ne dépasse pas la puissance nominale du transformateur. Par exemple, si la puissance du transformateur est de 20 VA et le courant secondaire est de 5 A, la résistance du circuit secondaire ne doit pas être supérieure à la valeur suivante:

$$r = \frac{P}{I_2^2} = \frac{20}{25} = 0,8 \text{ ohm}.$$

Lors du calcul, il faut tenir compte de la résistance des fils. La charge admissible des transformateurs de courant doit être comprise entre 15 et 75 VA.

Dans les transformateurs de courant une extrémité de l'enroulement secondaire et l'enveloppe sont mises à la terre pour les mêmes raisons de sécurité que dans les transformateurs de tension. Les transformateurs de courant se divisent en plusieurs catégories selon différents indices.

Selon le genre de montage: transformateurs destinés à fonctionner à l'intérieur des édifices ou à l'extérieur. Selon le genre d'isolation: en transformateurs secs isolés

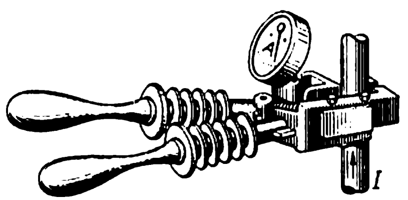


Fig. 349. Pince ampèremétrique

à la porcelaine ou au papier, à bain d'huile, à matière compound. Selon leur construction, les transformateurs se classent en transformateurs à bobines, de traversée, à barres, transformateurs incorporés aux disjoncteurs à bain d'huile, à isolement à la porcelaine, à bain d'huile et transformateurs « support ». Selon le nombre de circuits secondaires les transformateurs se classent en transformateurs à un et à deux enroulements. Dans le dernier cas le transformateur comporte deux enroulements secondaires enroulés sur deux noyaux. Un tel transformateur sert à alimenter deux circuits secondaires séparés: par exemple, un enroulement sert à alimenter les appareils de mesure, et l'autre, les relais.

Selon le nombre de spires de l'enroulement primaire, les transformateurs se classent en transformateurs à une spire et transformateurs à spires multiples.

D'après leur précision, les transformateurs de courant se divisent en 5 classes: 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 et 10. Les chiffres désignent l'erreur en pour cent du rapport de transformation.

Selon leur destination, les transformateurs se classent en appareils fixes et mobiles. Ces derniers ont un rapport de transformation variable. Ainsi, ils peuvent avoir 28 rapports de transformation différents.

La pince ampèremétrique est un transformateur de courant de construction particulière (fig. 349). Le noyau en acier peut être ouvert à l'aide de poignées isolantes et

embrasser un fil ou une barre. Un ampèremètre fixé sur la pince est réuni aux extrémités de l'enroulement secondaire qui est enroulé sur le noyau du transformateur. L'enroulement primaire est formé par le fil ou la barre parcourue par le courant à mesurer.

Les transformateurs de courant sont utilisés pour le branchement des ampèremètres, des enroulements série

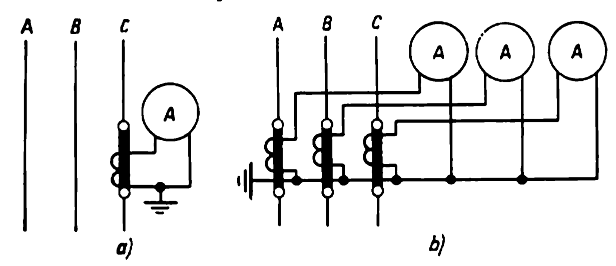


Fig. 350. Utilisation des transformateurs de courant pour la mesure du courant :
a—à charge équilibrée, b—à charge non équilibrée

des wattmètres, des compteurs, des phasemètres, des relais de courant, etc.

La figure 350 montre le mode d'utilisation des transformateurs de courant : *a* — mesure du courant, la charge des phases étant équilibrée ; *b* — mesure du courant, la charge des phases étant déséquilibrée.

La signification des lettres employées pour la désignation des transformateurs de courant de fabrication soviétique :

Т — transformateur de courant ;
П — transformateur de traversée ;
Ш — transformateur à barre ;
У — renforcé ;
Ф — isolation de porcelaine entre les enroulements primaire et secondaire ;
Д — noyau d'exécution spéciale pour protection différentielle ;
З — transformateur doté d'un noyau de type spécial pour la protection contre un court-circuit à la terre ;
Р — noyau à éléments séparables ;
О — transformateur à une spire (l'enroulement primaire est une barre de cuivre) ;
К — transformateur à bobines ;
В — transformateur incorporé à un disjoncteur ;

М — transformateur modernisé;
Б — transformateur à saturation rapide.

Le premier chiffre après les lettres désigne la tension en kV, le second (1 ou 2 chiffres) désigne le nombre d'enroulements secondaires et leur classe de précision.

Ainsi, ТПФУД-10-0,5/Д signifie: transformateur de courant de traversée, à isolation renforcée en porcelaine, pour 10 kV, à deux enroulements dont l'un est de classe de précision 0,5 et l'autre est prévu pour la protection différentielle.

La figure 351 montre un transformateur de courant ТФНД-220 (tension nominale: 220 kV, hauteur: 3770 mm, poids avec l'huile: 4400 kg).

Fig. 351. Transformateur de courant ТФНД-220

§ 173. MESURE DES INTENSITÉS DE COURANT

Pour mesurer l'intensité de courant dans un circuit, on utilise des ampèremètres branchés en série avec le circuit dans lequel on veut mesurer l'intensité de courant. Pour que le courant dans le circuit ne change pas après le branchement de l'ampèremètre il faut que la résistance de l'enroulement de l'appareil soit très faible. A cette fin, l'enroulement d'un ampèremètre comporte un nombre réduit de spires de gros fil. Pour étendre les limites de mesure de l'ampèremètre on utilise des shunts. Les shunts sont des lames de manganin ou des tiges soudées à des cosses de cuivre ou de laiton (fig. 352). Le shunt est branché en série avec le circuit. En parallèle avec le shunt est connecté l'ampèremètre (fig. 353). Le courant I dans le circuit se ramifie au point A en raison inverse des résistances r_a de l'ampèremètre et r_s du shunt:

$$\frac{I_a}{I_s} = \frac{r_s}{r_a}; \quad I_s = I - I_a,$$

d'où la résistance du shunt :

$$r_s = \frac{I_a r_a}{I - I_a}.$$

Désignons par n le rapport du courant I au courant I_a (le nombre n est parfois appelé *coefficient de shuntage*). On peut alors écrire l'expression pour r_s de façon suivante :

$$r_s = \frac{r_a}{n - 1}.$$

Exemple 1. Déterminer la résistance d'un shunt pour un ampèremètre de 5 A à résistance interne de 0,006 ohm nécessaire pour mesurer un courant de 20 A.

$$I_a = 5 \text{ A}; \quad r_a = 0{,}006 \text{ ohm}; \quad I = 20 \text{ A}.$$

$$n = \frac{20}{5} = 4;$$

$$r_s = \frac{r_a}{n - 1} = \frac{0{,}006}{3} = 0{,}002 \text{ ohm}.$$

Pour les intensités de courant ne dépassant pas 100 A, les shunts sont placés à l'intérieur de l'appareil (shunts

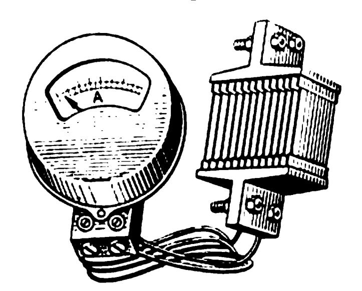


Fig. 352. Ampèremètre avec shunt

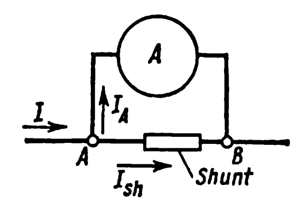


Fig. 353. Schéma de branchement d'un ampèremètre avec shunt

intérieurs). Pour de fortes intensités les shunts sont disposés en dehors de l'appareil et sont réunis à ce dernier par des fils dont la résistance est exactement connue (autrement, la répartition des courants sera différente et la mesure sera faussée). On trouve des shunts universels prévus pour plusieurs calibres. Les appareils fonctionnant toujours avec leurs shunts individuels sont étalonnés compte tenu du shunt, ce qui est marqué sur l'échelle de l'appareil. On utilise souvent aussi des shunts calibrés. Un tel shunt

peut être utilisé avec un appareil quelconque prévu pour la même chute de tension que celle du shunt donné. Les shunts ne sont généralement utilisés qu'avec des appareils magnéto-électriques servant à mesurer l'intensité en courant continu.

Pour étendre les limites de mesure des ampèremètres dans les circuits à courant alternatif, on utilise des transformateurs de courant.

§ 174. MESURE DES TENSIONS

Pour mesurer les tensions on utilise des voltmètres. Les voltmètres sont branchés en parallèle avec la portion du circuit dont on veut mesurer la tension. Pour que l'appareil n'absorbe pas un fort courant et n'influe pas sur la tension du réseau, son enroulement doit présenter une grande résistance. Plus la résistance interne d'un voltmètre est grande, plus la mesure de la tension sera précise. Pour cette raison, l'enroulement d'un voltmètre comporte un grand nombre de spires en fil fin.

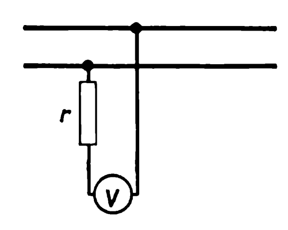


Fig. 354. Branchement d'une résistance additionnelle d'un voltmètre

Pour étendre les limites de mesure des voltmètres on utilise des résistances additionnelles branchées en série avec le voltmètre (fig. 354). Dans ce cas, la tension du réseau se répartit entre le voltmètre et la résistance additionnelle. Il faut choisir la valeur de la résistance additionnelle de façon que dans le circuit à tension augmentée l'enroulement du voltmètre soit parcouru par le même courant que dans le circuit à tension nominale. Le courant pour lequel est prévu l'enroulement de l'appareil:

$$I_V = \frac{U}{r_V} .$$

Dans un circuit dont la tension est n fois plus grande, le courant du voltmètre doté d'une résistance additionnelle r doit rester le même:

$$I_V = \frac{nU}{r_V + r} \quad \text{ou} \quad \frac{U}{r_V} = \frac{nU}{r_V + r} ,$$

d'où on détermine la valeur de la résistance additionnelle

$$r = r_V (n - 1).$$

Exemple 2. On dispose d'un voltmètre de 25 V à l'aide duquel on veut mesurer une tension de 150 V. Déterminer la valeur de la résistance additionnelle, la résistance interne du voltmètre étant de 1000 ohms.

$$r_V = 1000 \text{ ohms}, \quad n = 150 : 25 = 6.$$

$$r = r_V (n - 1) = 1000 (6 - 1) = 5000 \text{ ohms}.$$

Les résistances additionnelles sont en fil de manganin enroulé sur une carcasse en carton bakélisé ou en porcelaine. Les résistances additionnelles sont placées à l'intérieur ou à l'extérieur de l'appareil. Pour mesurer les hautes tensions en courant alternatif on utilise des transformateurs de tension.

§ 175. RHÉOSTATS

Dans les mesures électriques ainsi que lors de l'utilisation des machines électriques on emploie divers rhéostats.

On appelle *rhéostat* un dispositif présentant une certaine résistance que l'on peut varier de sorte que le courant et la tension du circuit changent. On trouve des rhéostats à curseur ou à levier, des rhéostats à résistance liquide, des rhéostats à lampes et des boîtes de résistances.

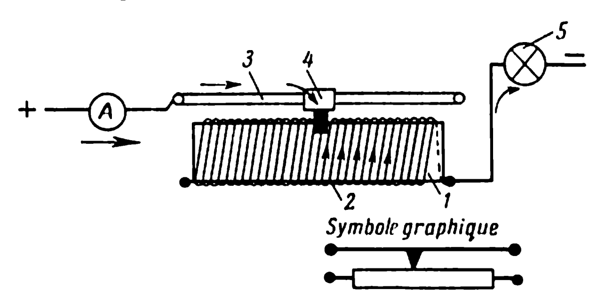


Fig. 355. Rhéostat à curseur

Rhéostat à curseur (fig. 355). Sur un tube en porcelaine *1* est enroulé un fil nu *2*. Grâce à un traitement spécial, la surface du fil est couverte d'une fine pellicule d'oxyde ne laissant pas passer le courant. Sur une tige métallique *3* glisse un curseur *4* qui touche le fil du rhéostat. Pour la

position du curseur, montrée sur la fig. 355, le passage du courant électrique est indiqué par des flèches. Une partie de la résistance du rhéostat est branchée en série avec la lampe *5* de sorte que l'intensité du courant passant par le filament de la lampe est diminuée et l'éclat de la lampe est, par conséquent, plus faible. Lorsqu'on déplace le curseur vers la droite, on diminue la résistance du rhéostat et l'éclat de la lampe augmente. Les rhéostats à curseur sont utilisés là où on a besoin de faire varier lentement et de façon progressive le courant dans le circuit.

Rhéostat à levier (fig. 356). Sur un cadre en matériau isolant sont fixées des spirales en fil métallique connectées

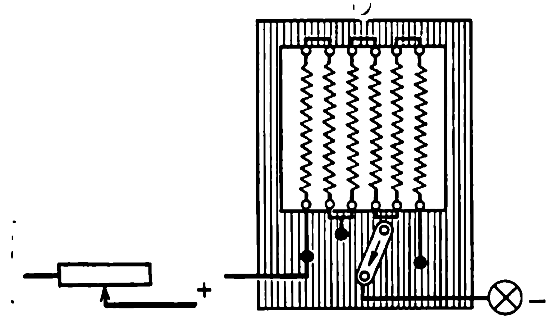


Fig. 356. Rhéostat à levier

en série. Au commencement, à la fin et aux endroits de connexion, les spirales comportent des prises qui aboutissent aux plots. En mettant le levier sur un plot déterminé du rhéostat on peut modifier la résistance et, par conséquent, le courant dans le circuit. Les variations du courant dans un tel rhéostat ont lieu par bonds et non progressivement. L'aspect extérieur d'un rhéostat à levier est donné à la figure 357.

Pour la construction des rhéostats à fil métallique on utilise le plus souvent le fer, le constantan, le manganin, le nichrome et la nickéline.

Rhéostat à résistance liquide (fig. 358). Ce rhéostat est formé par un bac métallique *1* contenant une solution de soude. Sur l'articulation *2* est fixé un levier *3* qui comporte une lame de fer ou de cuivre *4*. Le levier avec la lame est isolé du bac métallique par la garniture *5*. En soulevant ou en abaissant la lame dans la solution de soude, on peut

faire varier le courant dans le circuit. En faisant plonger la lame dans la solution on augmente la surface de contact avec la solution et on augmente ainsi le courant passant

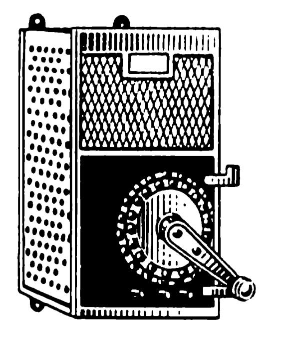


Fig. 357. Vue extérieure d'un rhéostat à levier

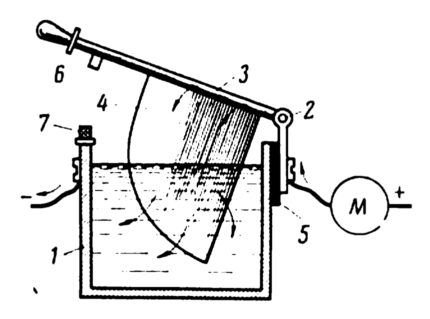


Fig. 358. Rhéostat à résistance liquide

par le rhéostat. Si l'on continue à enfoncer la lame, le contact *6* pénètre dans la borne *7* du bac métallique et le rhéostat est court-circuité, c'est-à-dire qu'il n'agit plus.

Les rhéostats liquides sont utilisés dans les circuits parcourus par de forts courants.

Le rhéostat à lampes (fig. 359) comporte plusieurs lampes électriques branchées en parallèle. On sait que si la résistance d'une lampe à incandescence est de 150 ohms, celle de

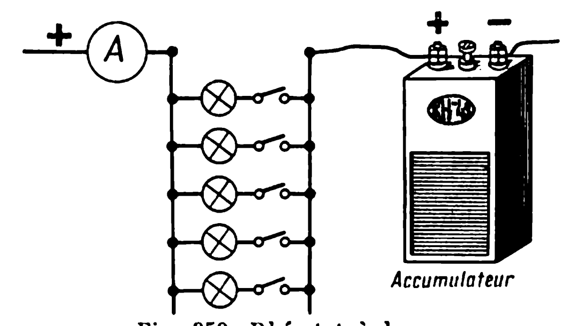


Fig. 359. Rhéostat à lampes

deux lampes en parallèle sera de 75 ohms, celle de trois lampes sera de 50 ohms, etc.

Ainsi, la résistance totale de plusieurs lampes identiques branchées en parallèle est égale à la résistance d'une

lampe divisée par le nombre de lampes branchées. Le rhéostat à lampes indiqué sur la figure est branché dans le circuit de charge d'un accumulateur et sert à régler le courant de charge.

La boîte de résistances (fig. 360) est formée par un jeu de résistances calibrées. Les extrémités des bobines de résistance *1* sont connectées à une plaque de cuivre découpée *2*. Lorsqu'on introduit dans les échancrures de la plaque *2* une fiche de cuivre *3*, elle réunit deux parties voisines de

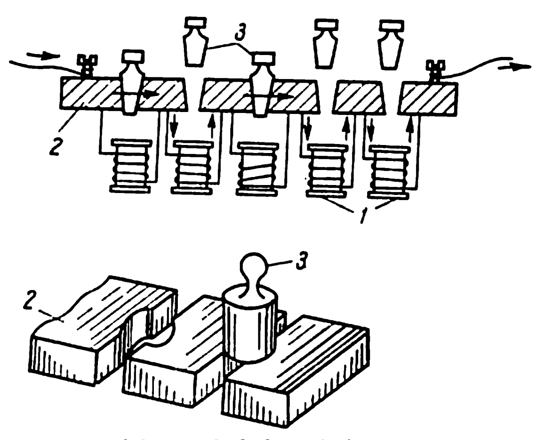


Fig. 360. Rhéostat à fiches (boîte de résistances)

la plaque. De cette façon, la résistance dont les extrémités sont connectées aux parties voisines de la plaque est court-circuitée.

Lorsqu'on retire la fiche, le courant passe par la bobine de résistance.

Les boîtes de résistances permettent de brancher dans le circuit des résistances calibrées et sont utilisées pour les mesures électriques.

§ 176. MESURE DE LA PUISSANCE ACTIVE

1. Courant continu. La formule de la puissance en courant continu $P = UI$ montre qu'on peut calculer la puissance en multipliant les indications de l'ampèremètre par celles d'un voltmètre. Mais en pratique, on mesure généralement la puissance à l'aide d'appareils spéciaux appelés wattmètres. Examinons le schéma d'un wattmètre électrodynami-

que (fig. 361). Le wattmètre comprend deux bobines dont une bobine fixe *1* qui comporte un petit nombre de spires en gros fil et une bobine mobile *2* à grand nombre de spires en fil fin. Lorsqu'on branche le wattmètre, le courant de charge passe par la bobine fixe connectée en série avec le circuit tandis que la bobine mobile est connectée en parallèle avec le récepteur. Afin de diminuer la puissance absorbée dans la bobine parallèle et diminuer son poids, on

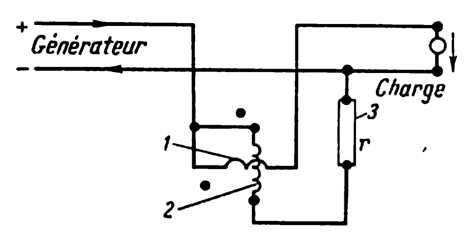


Fig. 361. Schéma de principe d'un wattmètre électrodynamique

branche, en série avec elle, une résistance additionnelle *3* en fil de manganin. De l'interaction des champs magnétiques des bobines mobile et fixe il résulte un couple moteur qui est proportionnel aux courants des deux bobines:

$$C = c_1 I_1 I_2.$$

Le courant dans l'enroulement parallèle, la résistance du circuit parallèle étant constante, est proportionnel à la tension du circuit. On a donc:

$$C = c_2 I_1 U = c_2 P,$$

c'est-à-dire que le couple moteur de l'appareil est proportionnel à la puissance absorbée dans le circuit.

Pour que l'aiguille de l'appareil dévie vers la droite à partir de zéro il faut que le courant traverse la bobine dans un sens déterminé.

A cette fin, les deux bornes indiquant les commencements des enroulements sont désignées par le repère * et sont connectées électriquement. Sur le cadran du wattmètre on indique le courant nominal et la tension nominale de l'appareil. Par exemple, si sur le cadran de l'appareil est marqué 5 A, 150 V, l'appareil peut mesurer une puissance de 750 W. Les échelles de certains wattmètres sont graduées en divisions. Si, par exemple, un wattmètre de 5 A et 150 V

comporte 150 divisions, la valeur d'une division, ou ce qu'on appelle la constante du wattmètre, est 750 : 150 = = 5 W/division.

Pour la mesure de la puissance dans les circuits à courant continu on utilise aussi des wattmètres ferrodynamiques.

2. Courant monophasé. Lorsqu'on branche un wattmètre dans un circuit à courant alternatif, les champs magnétiques des bobines mobile et fixe, en agissant l'un sur l'autre, font pivoter la bobine mobile. Le couple de rotation instantané de l'équipage mobile de l'appareil est proportionnel au produit des valeurs instantanées des courants parcourant

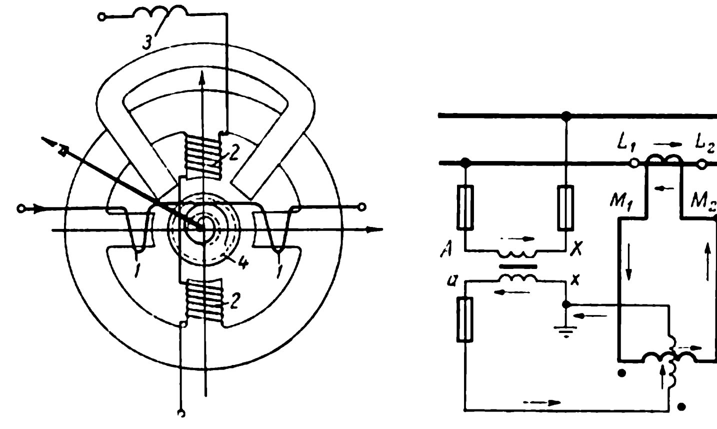


Fig. 362. Organisation schématique d'un wattmètre à induction à champ tournant

Fig. 363. Branchement d'un wattmètre à l'aide de transformateurs de mesure

les deux bobines de l'appareil. Mais, à cause des variations rapides des courants l'équipage mobile est incapable de les suivre et le couple moteur de l'appareil devient proportionnel à la puissance moyenne ou active $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$. Par conséquent, d'après l'angle de déviation de l'équipage mobile du wattmètre on peut juger de la puissance active absorbée par le circuit.

Pour mesurer la puissance en courant alternatif on utilise également des wattmètres à induction. La figure 362 montre le schéma de branchement d'un wattmètre à induction à champ magnétique tournant. L'enroulement série *1-1* à petit nombre de spires en gros fil est placé sur deux

pôles opposés et est connecté en série avec le circuit. L'enroulement parallèle *2-2* du wattmètre, à grand nombre de spires en fil fin, est placé sur deux pôles séparés. En série avec l'enroulement *2-2* est connectée une inductance *3* servant à assurer un déphasage de 90° entre la tension et le courant. De cette façon, avec une charge purement ohmique on obtient un déphasage de 90° entre les courants parcourant l'enroulement série et l'enroulement parallèle, ce qui est nécessaire pour créer un champ magnétique tournant. Lorsqu'on branche l'appareil, ce champ en coupant le cylindre en aluminium *4* y induit des courants de Foucault qui, en interaction avec le champ, créent un couple moteur agissant sur l'équipage mobile de l'appareil. L'angle de déviation de l'équipage mobile pour n'importe quelle charge est proportionnel à la puissance active absorbée par le circuit:

$$P = UI\cos\varphi.$$

Le schéma de principe d'un wattmètre à induction à champ progressif est indiqué sur la figure 335.

Lorsqu'à l'aide d'un wattmètre on mesure la puissance dans un réseau de basse tension et de forts courants on utilise des transformateurs de courant. Pour diminuer la différence de potentiel entre les enroulements du wattmètre les circuits primaire et secondaire du transformateur de courant ont un point commun. L'enroulement secondaire du transformateur n'est pas mis à la terre, car cela signifierait la mise à la terre d'un fil du réseau.

Dans ce cas pour déterminer la puissance du réseau P_1 il faut multiplier l'indication du wattmètre P_2 par le rapport de transformation du transformateur de courant k_c

$$P_1 = P_2 k_c.$$

Dans les réseaux de haute tension, lors de la mesure de la puissance, on utilise des transformateurs de tension et de courant (fig. 363). Pour obtenir la puissance du réseau P_1 il faut multiplier l'indication du wattmètre P_2 par le produit des rapports de transformation du transformateur de tension et du transformateur de courant

$$P_1 = P_2 k_t k_c.$$

Par exemple, si le wattmètre est branché sur un transformateur de tension 6000/100 V et un transformateur de

courant 150/5 A et le wattmètre indique 80 W, la puissance du réseau est :

$$P_1 = 80 \cdot \frac{6000}{100} \cdot \frac{150}{5} = 144\,000 \text{ W} = 144 \text{ kW}.$$

Lorsqu'on veut brancher des wattmètres (des compteurs) par l'intermédiaire des transformateurs de mesure, il faut brancher ces appareils de façon que leurs enroulements soient parcourus par des courants dans le même sens comme s'ils étaient branchés directement sur le réseau.

On peut déterminer la puissance d'un courant monophasé d'après les indications de trois appareils : un ampèremètre, un voltmètre et un phasemètre d'après la formule :

$$P = UI \cos \varphi.$$

3. Courant triphasé. Lorsque la charge d'un système triphasé est équilibrée, on utilise, pour mesurer la puissance, un seul wattmètre monophasé branché suivant le schéma de la figure 364.

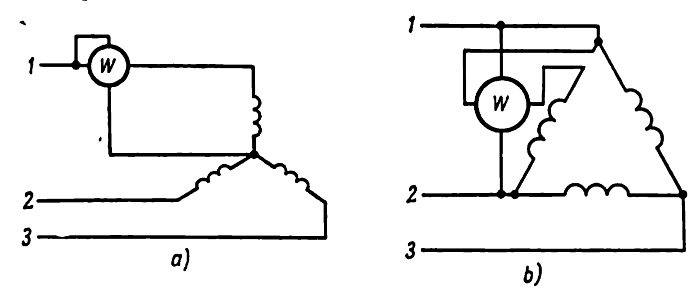


Fig. 364. Branchement d'un wattmètre monophasé à charge équilibrée (système à trois fils) :
a — pour la connexion en étoile ; *b* — pour la connexion en triangle

L'enroulement série du wattmètre est alors parcouru par le courant simple et l'enroulement dérivation est branché sur la tension simple. Le wattmètre indique donc la puissance d'une phase. Pour obtenir la puissance du système triphasé, il faut multiplier par trois l'indication du wattmètre monophasé.

Lorsque la charge d'un réseau à quatre fils est déséquilibrée, pour mesurer la puissance, on utilise le montage à trois wattmètres (fig. 365). Chaque wattmètre monophasé

mesure la puissance d'une phase. Pour obtenir la puissance du système triphasé il faut prendre la somme des indications des trois wattmètres.

Avec une charge variable il est difficile de faire simultanément la lecture des indications des trois wattmètres. De plus, trois wattmètres monophasés occupent beaucoup de place. On utilise donc souvent un wattmètre triphasé à trois éléments formé par la réunion de trois wattmètres monophasés dans un seul appareil. Dans un wattmètre électrodynamique à trois éléments, les trois bobines dérivation mobiles sont calées sur le même axe lié à l'aiguille et le couple résultant obtenu par addition des efforts mécaniques de chaque bobine est proportionnel à la puissance absorbée dans le réseau triphasé. Dans des wattmètres d'autres systèmes les bobines mobiles disposées aux endroits différents sont liées entre elles par des rubans flexibles et transmettent l'effort total à l'axe portant l'aiguille.

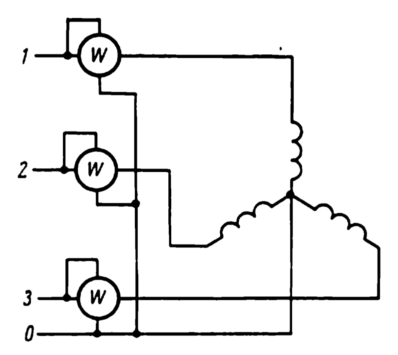


Fig. 365. Branchement de trois wattmètres monophasés pour mesurer la puissance dans un réseau triphasé

On peut déterminer la puissance active d'un réseau triphasé à charge équilibrée à l'aide de trois appareils: un ampèremètre, un voltmètre et un phasemètre d'après la formule:

$$P = \sqrt{3}\, UI \cos \varphi,$$

où U et I sont respectivement la tension et le courant composés;

φ est l'angle de déphasage entre la tension et le courant.

La puissance d'un réseau triphasé à trois fils à charge équilibrée ou déséquilibrée peut être mesurée indépendamment de la connexion du récepteur (en étoile ou en triangle) par la méthode de deux wattmètres.

D'après la première loi de Kirchhoff, la somme des valeurs instantanées des courants de toutes les trois phases

est nulle:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0,$$

d'où

$$i_2 = -i_1 - i_3.$$

La puissance instantanée d'un système triphasé est:

$$p = i_1u_1 + i_2u_2 + i_3u_3,$$

où u avec indices sont des valeurs instantanées des tensions simples.

En introduisant dans la dernière expression la valeur du courant i_2 on obtient:

$$p = i_1u_1 - i_1u_2 - i_3u_2 + i_3u_3$$

ou

$$p = i_1(u_1 - u_2) + i_3(u_3 - u_2).$$

Cette dernière équation montre qu'un des wattmètres doit être branché de façon que sa bobine de courant soit

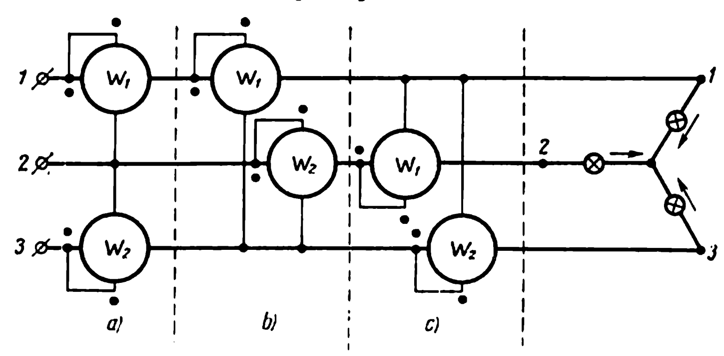


Fig. 366. Schéma de branchement de deux wattmètres

parcourue par le courant de la première phase et la bobine de tension soit branchée sur les première et deuxième phases. Le second wattmètre doit être branché de façon que sa bobine de courant soit parcouru par le courant de la troisième phase et la bobine de tension soit branchée sur les deuxième et troisième phases.

En additionnant les indications des deux wattmètres on obtient la puissance de toutes les trois phases.

La figure 366 montre trois versions de la méthode de deux wattmètres.

Le schéma de la figure 366 indique que les enroulements série des wattmètres sont branchés dans deux fils

quelconques du réseau. Les commencements des enroulements dérivation de chaque wattmètre sont branchés au même fil dans lequel est inséré l'enroulement série du wattmètre. Les fins des enroulements dérivation sont connectées au troisième fil de ligne.

Pour une charge active équilibrée ($\cos \varphi = 1$) les indications des wattmètres sont les mêmes. Pour un $\cos \varphi$ qui n'est pas égal à l'unité, les indications des wattmètres

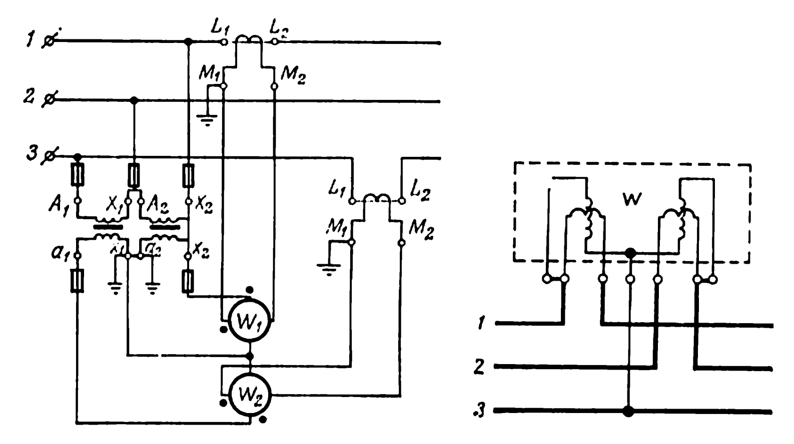


Fig. 367. Mesure de la puissance par la méthode de deux wattmètres à l'aide de transformateurs de mesure

Fig. 368. Schéma de branchement d'un wattmètre triphasé à deux éléments

diffèrent. Lorsque le $\cos \varphi = 0{,}5$, l'un des wattmètres indique zéro. Lorsque le $\cos \varphi$ est inférieur à 0,5, l'aiguille de ce wattmètre commence à dévier vers la gauche. Pour obtenir l'indication requise de l'appareil, il faut intervertir les bouts de l'enroulement série ou de l'enroulement dérivation.

Pour mesurer la puissance active d'un système triphasé à l'aide de deux wattmètres il faut additionner leurs indications ou retrancher de l'indication d'un wattmètre celle d'un autre qui était négative. Le schéma de mesure de la puissance par la méthode de deux wattmètres en utilisant des transformateurs de mesure de tension et de courant est donné sur la figure 367.

Il est bien plus commode de mesurer la puissance avec un wattmètre triphasé qui combine deux appareils branchés suivant la méthode de deux wattmètres et agissant sur un

axe commun auquel est liée l'aiguille. Dans les appareils électrodynamiques et ferrodynamiques deux bobines mobiles situées sur le même axe ou liées par des rubans flexibles font tourner le même axe. Dans les appareils à induction deux éléments font tourner deux disques calés sur le même axe ou deux éléments agissent sur un seul disque. Le schéma de branchement d'un wattmètre triphasé à deux éléments est donné par la figure 368.

Dans les réseaux de haute tension un wattmètre triphasé est mis en circuit à l'aide des transformateurs de tension et de courant.

§ 177. MESURE DE L'ÉNERGIE ACTIVE

1. Courant continu. Pour mesurer la consommation d'énergie en courant continu on emploie des compteurs électrodynamiques, magnéto-électriques ou électrolytiques.

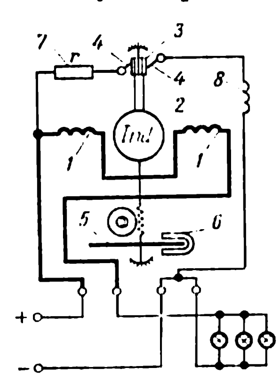


Fig. 369. Organisation schématique d'un compteur électrodynamique à courant continu

Les plus répandus sont les compteurs électrodynamiques (fig. 369). Les bobines de courant fixes *1-1* comprenant un petit nombre de spires en gros fil sont branchées en série dans le circuit. La bobine mobile de forme sphérique *2* appelée ici induit est fixée sur un axe pouvant tourner dans des crapaudines. L'enroulement d'induit comporte un grand nombre de spires en fil fin et est fr actionné en plusieurs sections. Les extrémités des sections sont soudées aux lames du collecteur *3* sur lequel frottent des balais métalliques plans *4*. La tension du réseau est appliquée à l'enroulement d'induit par l'intermédiaire d'une résistance additionnelle *7*. Lors du fonctionnement du compteur, grâce à l'interaction du courant parcourant l'induit et du flux magnétique dû aux bobines de courant fixes, un couple moteur C_m est créé sous l'influence duquel l'induit commence à tourner. Puisque le collecteur à des instants déterminés met sous la tension du réseau des sections de l'enroulement qui se suivent, l'induit tourne dans le même sens

et il en résulte que $C_m = c_1 \cdot i_{ind} \cdot \Phi$. Mais étant donné que i_{ind} est proportionnel à U et Φ est proportionnel à I, on a $C_m = c_2 \cdot UI = c_2 P$, ce qui prouve que le couple moteur du compteur est proportionnel à la puissance absorbée dans le réseau. Sur l'axe du compteur est calé un disque en aluminium *5* qui tourne dans le champ d'un aimant permanent *6*. Les courants de Foucault qui sont induits dans le disque en interaction avec le champ de l'aimant, créent un couple résistant C_r proportionnel à la vitesse du disque:

$$C_r = c_3 n.$$

Lorsque la vitesse de rotation est constante, le couple moteur et le couple résistant du compteur sont égaux l'un à l'autre:

$$C_m = C_r,$$

ou

$$c_2 P = c_3 n,$$

d'où

$$P = \frac{c_3}{c_2} n = cn,$$

c'est-à-dire que la vitesse de rotation du compteur est proportionnelle à la puissance absorbée dans le réseau. En examinant un compteur électrodynamique on peut noter que son fonctionnement rappelle celui d'un moteur à courant continu excité en dérivation. La destination du collecteur dans le compteur est la même que dans un moteur à courant continu.

On juge de la quantité d'énergie électrique absorbée par le réseau d'après le nombre de tours faits par l'induit (par le disque). Par une transmission à vis sans fin ou une transmission par engrenages la rotation de l'axe est transmise à un mécanisme de comptage et on choisit la transmission de façon que le mécanisme de comptage marque la dépense d'énergie en hectowattheures ou en kilowattheures.

La quantité d'énergie qui correspond à un tour de l'induit est appelée *constante de compteur*. Le nombre de tours de l'induit par unité d'énergie électrique enregistrée est appelé *rapport de transmission*. Pour pouvoir vérifier le compteur on indique sur sa plaque la constante de compteur ou le rapport de transmission.

Exemple 3. Sur la plaque du compteur est marqué: « 1 kWh = = 12 000 tours de l'induit ». Lors de la vérification du compteur son disque a fait 120 tours en 50 secondes. Déterminer la puissance absorbée par le réseau 1 kWh = 1000 Wh = 3 600 000 Ws.

La constante de compteur est:

$$\frac{3\,600\,000}{12\,000}\ \text{Ws/tr.}$$

L'énergie absorbée correspondant à 120 tours:

$$\frac{3\,600\,000\cdot 120}{12\,000}\ \text{Ws.}$$

La puissance absorbée par le réseau est

$$\frac{3\,600\,000\cdot 120}{12\,000\cdot 50}=720\ \text{W.}$$

Pour compenser le frottement, le compteur comporte, en série avec l'enroulement d'induit, une bobine complémentaire *S* (fig. 369) dont le champ magnétique agit sur

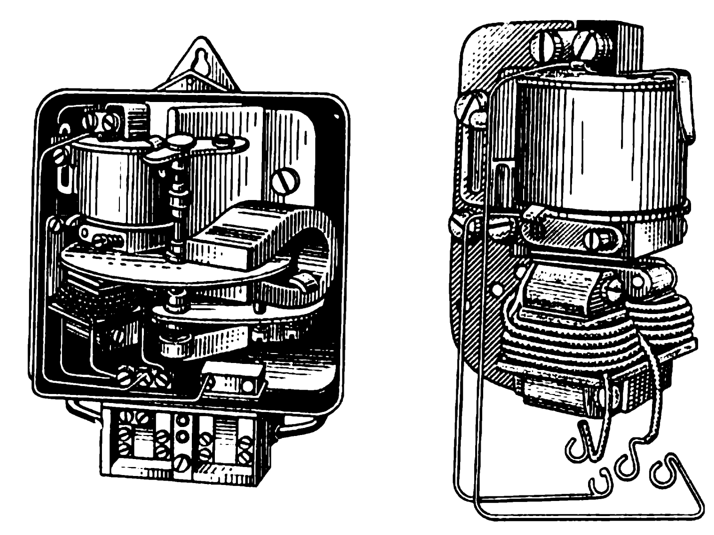


Fig. 370. Organisation intérieure d'un compteur à induction monophasé (à gauche) et vue d'ensemble du circuit magnétique avec les bobines du compteur (à droite)

le courant parcourant l'induit en développant un couple moteur supplémentaire qui compense l'influence du frottement.

2. Courant monophasé. Pour mesurer l'énergie active dans un circuit à courant monophasé, on utilise des compteurs à induction. Un compteur à induction est presque analogue par sa construction à un wattmètre à induction. La différence consiste en ce que le compteur ne comporte pas de ressort créant un couple résistant, ce qui permet au disque du compteur de tourner librement. L'aiguille et l'échelle du wattmètre sont remplacées dans le compteur par le mécanisme de comptage. L'aimant permanent qui dans le wattmètre sert d'amortisseur crée dans le compteur un couple résistant. La figure 370 présente un compteur monophasé à induction et la figure 371 le schéma de branchement de ce compteur dans le réseau.

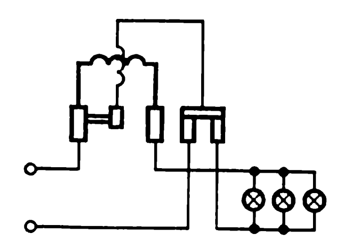


Fig. 371. Schéma de branchement d'un compteur monophasé sur le réseau

3. Courant triphasé. On peut mesurer l'énergie active d'un courant triphasé à l'aide de deux compteurs monophasés branchés dans le réseau suivant le schéma analogue à celui utilisé dans la méthode de deux wattmètres. Cependant, il est plus commode de mesurer l'énergie à l'aide d'un compteur triphasé d'énergie active qui combine deux compteurs monophasés dans un seul appareil. Le schéma de branchement d'un compteur triphasé d'énergie active à deux éléments est le même que celui d'un wattmètre correspondant.

Dans un réseau triphasé à quatre fils, pour la mesure d'énergie active on utilise un schéma analogue à celui utilisé dans la méthode de trois wattmètres ou un compteur triphasé à trois éléments. Le comptage de l'énergie d'après les indications des compteurs branchés suivant les schémas indiqués plus haut se fait de la même façon que le comptage de la puissance d'après les mêmes schémas.

Dans les réseaux de haute tension les compteurs sont branchés par l'intermédiaire de transformateurs de tension et de courant.

§ 178. MESURE DE L'ÉNERGIE RÉACTIVE

1. Courant monophasé. On peut déterminer l'énergie réactive d'après les indications d'un ampèremètre, d'un voltmètre, d'un phasemètre et d'un chronomètre. Si l'on

connaît la valeur du cos φ, on peut trouver d'après les tables trigonométriques la valeur du sin φ et en introduisant dans la formule

$$A_r = UIt \sin \varphi$$

les valeurs numériques, on trouve la valeur de l'énergie réactive. Des compteurs spéciaux monophasés d'énergie réactive ne sont pas répandus.

2. Courant triphasé. Pour mesurer l'énergie réactive dans un réseau de courant triphasé on peut utiliser des

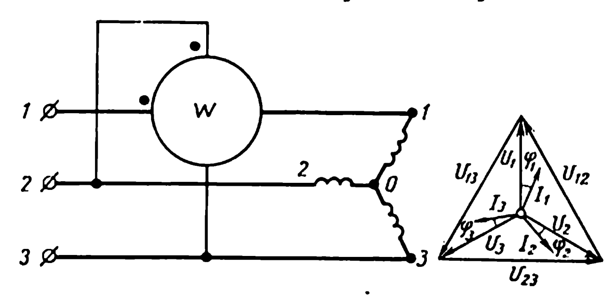


Fig. 372. Schéma pour mesurer l'énergie réactive à l'aide d'un compteur monophasé d'énergie active

compteurs ordinaires d'énergie active et des compteurs spéciaux d'énergie réactive.

Lorsque la charge d'un système triphasé est équilibrée, pour mesurer l'énergie réactive on peut utiliser un compteur monophasé d'énergie active ordinaire branché suivant le schéma de la figure 372. L'enroulement série du compteur est parcouru par le courant I_1 de la première phase et l'enroulement dérivation est branché sur la tension composée U_{23} en retard sur la tension simple U_1 de 90°. La tension U_{23} est $\sqrt{3}$ fois plus grande que U_1 (voir le diagramme vectoriel de la fig. 372, à droite); on a donc:

$$A_r = U_{23} I_1 t \cos (90° - \varphi_1) = \sqrt{3}\, U_1 I_1 t \sin \varphi_1.$$

Le compteur enregistrera l'énergie réactive de la première phase multipliée par $\sqrt{3}$.

Pour calculer l'énergie réactive absorbée par le système riphasé entier il faut multiplier par $\sqrt{3}$ l'indication du compteur branché suivant le schéma indiqué. Examinons l'organisation d'un compteur triphasé d'énergie réactive.

Elle est analogue à celle d'un wattmètre triphasé à deux éléments. Les enroulements dérivation des deux éléments sont branchés sur le réseau suivant le schéma de la figure 373. Sur des noyaux en U sont placés quatre et non pas deux enroulements série. Sur l'une des branches du noyau en U du premier élément est placé un enroulement série *1*. Le deuxième enroulement série *2* est placé sur la seconde branche du noyau du premier système et le troisième enroulement série *3* est placé sur la première branche du second

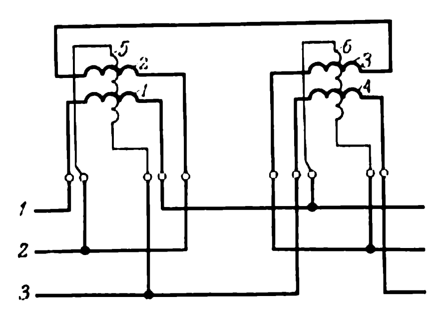


Fig. 373. Schéma d'un compteur électrodynamique triphasé d'énergie réactive du type ИР

système. Enfin, le quatrième enroulement série *4* est placé sur la seconde branche du noyau en U du second élément. Les enroulements dérivation *5* et *6* sont connectés comme il est indiqué sur le schéma. Lorsqu'on branche un compteur d'énergie réactive il faut observer l'ordre des phases.

§ 179. MESURE DU FACTEUR DE PUISSANCE

On peut déterminer la valeur du facteur de puissance dans les réseaux monophasés d'après les indications d'un voltmètre, d'un ampèremètre et d'un wattmètre par la formule :

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI} .$$

A l'aide des mêmes appareils on peut trouver le facteur de puissance dans un réseau triphasé à charge équilibrée en se servant de la formule :

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}\, UI} ,$$

où U et I sont la tension et le courant composés et φ est l'angle de déphasage entre la tension simple et le courant.

On peut trouver la valeur moyenne du facteur de puissance ($\cos\varphi_{moy}$) pendant un intervalle de temps déterminé d'après les indications des compteurs d'énergie active et réactive pendant le même temps, à l'aide de la formule:

$$\cos\varphi_{moy} = \frac{A_a}{\sqrt{A_a^2 + A_r^2}},$$

où A_a est l'énergie active;

A_r est l'énergie réactive,

ou, en calculant

$$\operatorname{tg}\varphi_{moy} = \frac{A_r}{A_a},$$

on trouve d'après les tables trigonométriques le $\cos\varphi_{moy}$ correspondant.

La valeur instantanée du facteur de puissance est déterminée en pratique à l'aide d'un appareil spécial appelé phasemètre (fig. 374, *a*). Examinons l'organisation d'un

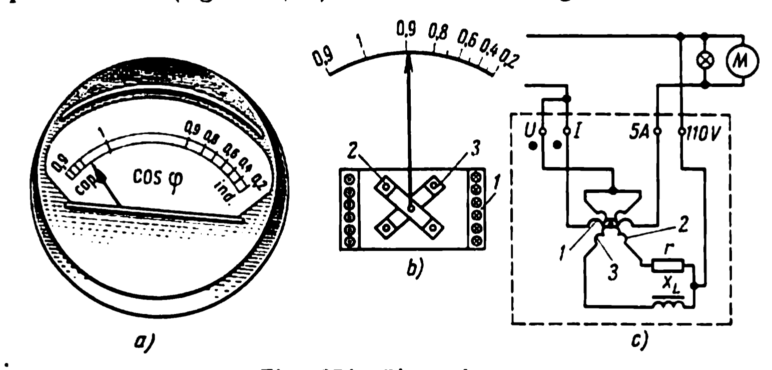


Fig. 374. Phasemètre:
a—vue d'ensemble; *b*—schéma de l'organisation; *c*—schéma des connexions intérieures et de branchement sur le réseau

phasemètre électrodynamique monophasé (fig. 374, *b* et *c*). L'appareil comprend une bobine fixe *1* branchée en série dans le réseau et deux bobines mobiles *2* et *3* calées sur le même axe et formant un angle de 90°. Les enroulements de ces bobines comportent un grand nombre de spires en fil fin et sont branchés en dérivation sur le réseau. La bobine *2* est connectée en série avec une résistance ohmique *r* et le

courant i_2 qui la parcourt est en phase avec la tension du réseau. La bobine *3* est connectée en série avec une grande réactance d'induction x_L et le courant i_3 dans cette bobine retarde de 90° sur la tension du réseau.

Le couple développé par la bobine *2* est proportionnel à la puissance active du réseau (comme dans un wattmètre électrodynamique) ; le couple de la bobine *3* est proportionnel à la puissance réactive du réseau. Les bobines sont branchées de façon que leurs couples soient opposés l'un à l'autre. La position dans l'espace de l'équipage mobile du phasemètre, déterminée par l'angle de rotation des bobines *2* et *3*, dépend de l'angle de déphasage φ entre la tension et le courant. On peut donc graduer l'échelle de l'appareil directement en valeurs du facteur de puissance cos φ.

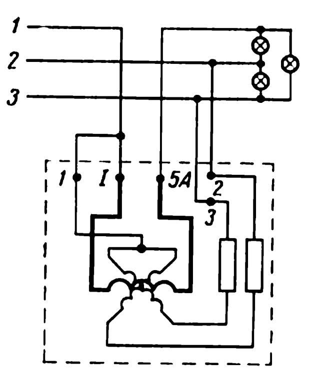


Fig. 375. Schéma des connexions intérieures d'un phasemètre triphasé et de son branchement sur le réseau

Le phasemètre ne comporte pas de ressort créant un couple antagoniste et, pour cette raison, lorsqu'on débranche l'appareil, son aiguille occupe une position quelconque. L'appareil a une échelle bilatérale. La partie droite de l'échelle indique la valeur du facteur de puissance pour une charge inductive, tandis que la partie gauche indique le facteur de puissance pour une charge capacitive.

Le schéma d'un phasemètre électrodynamique triphasé est indiqué sur la figure 375. Le déphasage entre les courants dans les bobines mobiles y est obtenu par le branchement correspondant des bobines sur le réseau triphasé et non par le choix des résistances et des inductances.

§ 180. MESURE DES RÉSISTANCES

1. Méthode utilisant un ampèremètre et un voltmètre. Dans un circuit à courant continu on peut mesurer les résistances d'après les schémas de la figure 376. Si l'on connaît la chute de tension dans la portion du circuit et le courant qui la parcourt, on peut calculer la résistance de

cette portion. Dans le schéma *a* l'ampèremètre est traversé par la somme des courants passant par la résistance à mesurer et par le voltmètre. La résistance peut être calculée d'après la formule :

$$r_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U_x}{I - I_v} = \frac{U_x}{I - \frac{U_x}{r_v}},$$

où I_v et r_v sont respectivement le courant et la résistance du voltmètre.

Dans le schéma *b* le voltmètre indique la chute de tension dans la résistance et dans l'enroulement de l'ampèremètre :

$$U = U_x + U_a,$$

où U_a est la chute de tension dans l'enroulement de l'ampèremètre. On peut calculer la résistance à mesurer d'après la formule :

$$r_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U - U_a}{I_x} = \frac{U - I_x r_a}{I_x},$$

où r_a est la résistance de l'enroulement de l'ampèremètre.

Le premier schéma (fig. 376, *a*) est utilisé pour déterminer des faibles résistances lorsque leur valeur est de

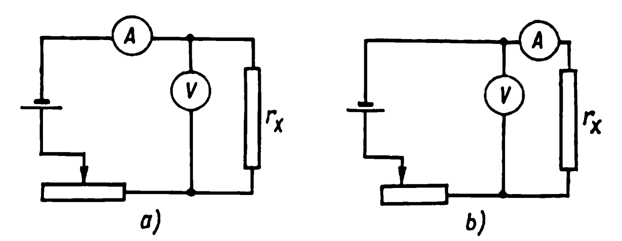


Fig. 376. Mesure des résistances par la méthode d'un ampèremètre et d'un voltmètre

beaucoup inférieure à celle de la résistance de l'enroulement du voltmètre. D'après le second schéma (fig. 376, *b*), on détermine la valeur des grandes résistances, car dans ce cas on peut négliger la résistance de l'enroulement de l'ampèremètre r_a.

En courant alternatif, d'après les indications d'un ampèremètre et d'un voltmètre, on peut déterminer la valeur

de l'impédance z du récepteur d'après la formule:

$$z = \frac{U}{I}.$$

Si l'on branche ce récepteur dans un circuit à courant continu, on peut déterminer sa résistance ohmique d'après les indications du voltmètre et de l'ampèremètre

$$r = \frac{U}{I},$$

à condition de négliger l'effet de peau.

Dans un circuit à courant alternatif, on peut déterminer la résistance ohmique directement d'après les indications d'un wattmètre et d'un ampèremètre selon la formule:

$$r = \frac{P}{I^2}.$$

D'après la formule

$$x = \sqrt{z^2 - r^2}$$

on trouve la réactance du récepteur.

Remarquons qu'en se servant seulement des indications de l'ampèremètre, du wattmètre et du voltmètre on ne peut pas déterminer le signe de x.

2. Pont de Wheatstone. La figure 377 montre le schéma de ce pont. La batterie *1* par l'intermédiaire de l'interrupteur *2* fournit la tension aux points A et C du pont. Dans l'autre diagonale du pont, à l'aide de l'interrupteur *3*, est branché le galvanomètre *4*. La résistance inconnue r_x est connectée entre les points A et B. En choisissant convenablement r_a, r_b et r, on fait de sorte que l'interrupteur *3* étant fermé, le galvanomètre indique 0. Il est à noter que les méthodes de zéro sont les méthodes de mesure les plus précises. Dans ce cas, le potentiel du point B est égal au potentiel du point D. Par conséquent:

$$U_{AD} = U_{AB} \quad I_a r_a = I_x r_x;$$

$$U_{DC} = U_{BC} \quad I_b r_b = I_r r.$$

En divisant les égalités terme par terme on obtient:

$$\frac{I_a r_a}{I_b r_b} = \frac{I_x r_x}{I_r r}.$$

Mais, étant donné que $I_a = I_b$ et $I_x = I_r$ (le galvanomètre n'est pas parcouru par le courant), on trouve après réduction

$$\frac{r_a}{r_b} = \frac{r_x}{r},$$

d'où

$$r_x = \frac{r_a}{r_b} r.$$

On utilise comme résistances r_a, r_b et r des boîtes de résistances.

La figure 378 montre un autre schéma de pont de Wheatstone. Entre les points A et C est tendu un fil calibré sur

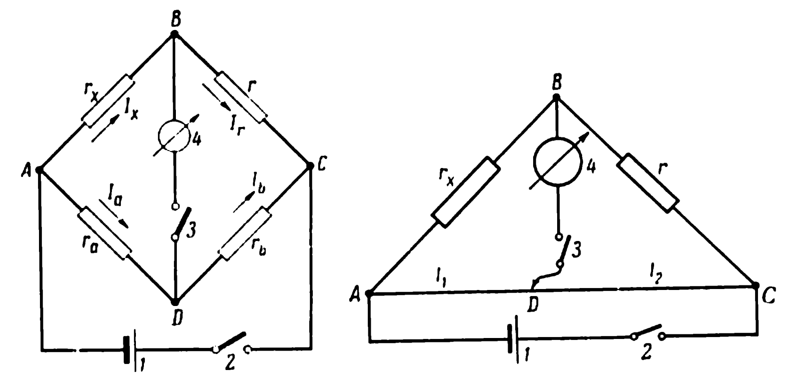


Fig. 377. Pont de Wheatstone

Fig. 378. Schéma d'un pont à résistance calibrée

lequel glisse un contact D. Entre les points C et B est connectée une boîte de résistances et entre les points A et B la résistance à mesurer. Pour déterminer r_x il faut multiplier la valeur de la résistance r choisie dans la boîte de résistances par le rapport $\frac{r_a}{r_b}$. Le rapport des résistances dans ce schéma du pont est remplacé par le rapport des longueurs des portions du fil calibré $\frac{l_1}{l_2}$ qui est indiqué sur l'échelle du pont.

Lors de la mesure de la résistance des conducteurs liquides les résultats des mesures sont considérablement perturbés par le phénomène de polarisation. Pour cette raison, en utilisant un pont on l'alimente en courant alternatif

fourni par une bobine d'induction munie d'un rupteur et branchée sur une source de tension continue.

Le pont de Wheatstone ne permet pas de mesurer des faibles résistances (inférieures à 1 ohm), car les résistances des fils et des contacts influent sur les résultats des mesures.

Pour mesurer des faibles résistances (enroulements d'induit des machines à courant continu, enroulements inducteurs des machines à excitation série, etc.) on emploie des ponts doubles.

3. Pont double. Son schéma est indiqué sur la figure 379, où r_x est la résistance à mesurer, r_N est une résistance étalon connue; m, n, m', n' sont des boîtes de résistances. Généralement, on prend $m = m'$ et $n = n'$. Aux points C et D est connecté un galvanomètre. En fermant l'interrupteur dans le circuit de la batterie, on applique la tension aux points A et B du montage. En choisissant convenablement les résistances m, m', n, n' (en conservant $m = m'$ et $n = n'$), on obtient la mise au zéro de l'aiguille du galvanomètre. Dans ce cas: $I_1 = I_1'$; $I = I'$ et $I_2 = I_2'$.

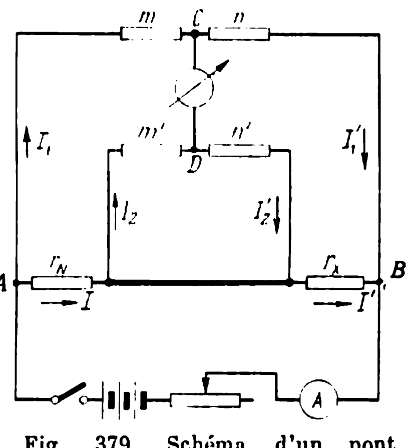


Fig. 379. Schéma d'un pont double

Selon la deuxième loi de Kirchhoff on a:

pour le circuit $ACDA$:

$$I_1 m - I_2 m' - I r_N = 0$$

ou

$$I r_N = I_1 m - I_2 m';$$

pour le circuit $CBDC$

$$I_1' n - I' r_x - I_2' n' = 0$$

ou

$$I' r_x = I_1' n - I_2' n'.$$

En divisant ces égalités terme par terme, on obtient:

$$\frac{I r_N}{I' r_x} = \frac{I_1 m - I_2 m'}{I_1' n' - I_2' n'}.$$

Puisque $m = m'$ et $n = n'$, on obtient :

$$\frac{r_N}{r_x} = \frac{(I_1 - I_2)\, m}{(I_1' - I_2')\, n} = \frac{m}{n}.$$

Il en résulte

$$r_x = r_N \frac{n}{m}.$$

Nous allons voir que les résistances de contact et les résistances des fils de connexion n'influent pas sur la précision des mesures.

Le courant de la batterie en arrivant au point A se répartit entre deux branches et se divise en courants I et I_1. Les courants I et I_1 rencontrent les résistances des fils de connexion, les résistances de contact qui sont en série avec les résistances m, n, m', n' et s'ajoutent à elles. Mais, puisque les résistances m, n, m' et n' ne sont pas inférieures de 10 ohms au moins, c'est-à-dire de beaucoup supérieures aux résistances des fils et aux résistances de contact et étant donné que dans la formule $r_x = r_N \frac{n}{m}$ les résistances n et m figurent sous forme de rapport, l'influence des résistances des fils et des résistances de contact est pratiquement nulle.

Pour augmenter la précision des mesures, le fil qui réunit les résistances r_N et r_x doit avoir une très faible résistance.

4. Mégohmmètres. Les mégohmmètres servent à mesurer la résistance d'isolement de différentes parties des équipements électriques par rapport à la terre ainsi que la résistance d'isolement d'une pièce par rapport à une autre.

Selon le règlement en vigueur, la résistance d'isolement des fils doit être de 1000 ohms au moins par volt de la tension de service. Par exemple, pour un réseau à tension de service de 220 V la résistance d'isolement doit être de 220 000 ohms au moins, c'est-à-dire de 0,22 mégohm.

La résistance d'isolement doit être mesurée sous une tension autant que possible égale à la tension de service, mais non inférieure à 100 V.

Les mégohmmètres dont les indications dépendent de la tension comprennent chacun une source de tension et un appareil de mesure. Si l'on branche en série avec le circuit une résistance réglable r, les indications de l'appareil de mesure (du voltmètre) dépendront de la valeur de cette résistance (la tension du circuit étant constante). Pour

$r = 0$ l'indication du voltmètre est maximale. Pour $r = \infty$ le voltmètre indique 0. En branchant dans le circuit différentes résistances, on peut étalonner l'échelle de l'appareil de mesure directement en ohms (en kilohms, en mégohms). Ensuite, on peut se servir d'un tel appareil pour mesurer des résistances si on utilise une source d'énergie à tension égale à celle utilisée lors de l'étalonnage.

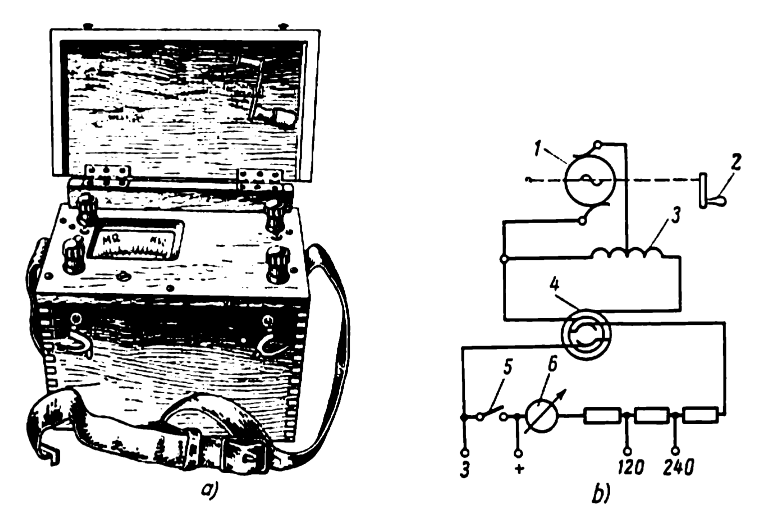


Fig. 380. Mégohmmètre du type МПИ:
a — vue d'ensemble; *b* — schéma électrique

La figure 380 représente le schéma d'un mégohmmètre du type МПИ. Le générateur de courant alternatif *1* est mis en mouvement à l'aide de la manivelle *2*. Le générateur alimente un auto-transformateur-élévateur *3* qui élève la tension jusqu'à 400 V. La tension alternative est transformée en tension continue par un redresseur *4*. Pour mesurer l'isolement d'un fil on met à la terre la borne *3*, on réunit la borne « + » à lame de cuivre du fil et en appuyant sur le bouton *5* on fait tourner la manivelle du générateur à une vitesse telle que l'aiguille de l'appareil *6* dévie entièrement. Ensuite, on lâche le bouton et on lit la résistance d'isolement sur l'échelle de l'appareil. L'appareil permet également de mesurer les tensions continues de 120 et de 240 V. Les mégohmmètres de ce type présentent

un défaut : leurs indications dépendent de la vitesse de rotation du générateur. Examinons maintenant l organisation d'un mégohmmètre dans lequel la variation de la vitesse du générateur n'influe pas sur la précision des mesures.

La figure 381 représente le schéma d'un mégohmmètre du type MOM fabriqué par l'usine « Electropribor ». L'équipage mobile de cet appareil est formé par deux bobines *1*

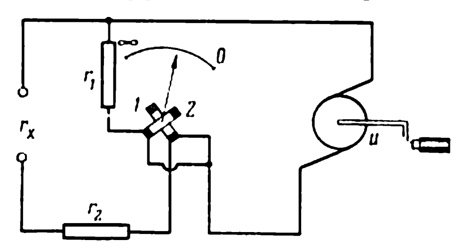


Fig. 381. Schéma d'un mégohmmètre du type MOM

et *2* calées sur un axe commun et situées dans le champ d'un aimant permanent sous un angle de 90° l'une par rapport à l'autre. Le générateur de 500 V (pour une vitesse de la manivelle de 120 tr/mn) fournit la tension aux deux bobines par des fils spéciaux. En série avec une bobine est branchée une résistance fixe (ou plusieurs résistances pour étendre les limites de mesures). En série avec l'autre bobine est branchée la résistance dont la valeur doit être déterminée. Les courants passant par les deux bobines en interaction avec le champ magnétique créent des couples moteurs de sens opposés.

Sur un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique agit une force :

$$F = BIl \sin \alpha.$$

Le couple moteur C_m agissant sur la bobine à w spires de largeur b et de longueur l égale approximativement à la longueur active de la bobine est

$$C_m = 2BIlw\frac{b}{2} \sin \alpha,$$

où α est l'angle entre la perpendiculaire menée au plan de la bobine et la direction du champ magnétique.

Puisque $l \cdot b$ est la surface de la bobine S, on a

$$C_m = BISw \sin \alpha.$$

Sur les bobines du mégohmmètre agissent les couples moteurs

$$C_1 = w_1 SB \sin \alpha I_1;$$

$$C_2 = w_2 SB \cos \alpha I_2.$$

En position d'équilibre, $C_1 = C_2$, d'où :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{w_2 I_2}{w_1 I_1} = c\,\frac{I_2}{I_1} = c\,\frac{r_1}{r_2 + r_x}.$$

L'angle de rotation de l'équipage mobile de l'appareil dépend du rapport des courants dans les bobines et ne dépend pas de la tension appliquée du générateur. Connaissant

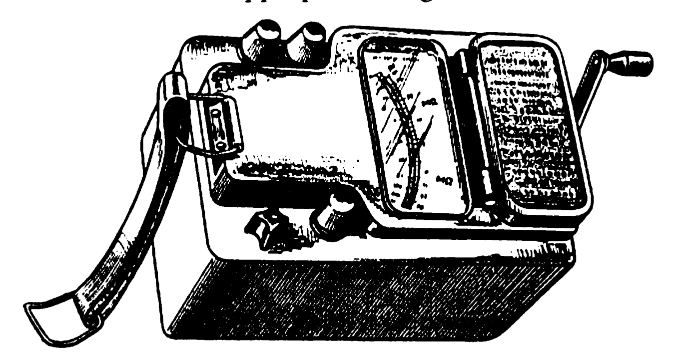


Fig. 382. Aspect extérieur d'un mégohmmètre du type M-1101

c, r_1, r_2 et l'angle α on calcule r_x. La variation de la vitesse de rotation de la manivelle dans de larges limites (de 60 à 180 tr/mn) n'influe pas sur la précision des mesures.

La figure 382 montre le mégohmmètre magnéto-électrique portatif M-1101.

Problèmes

1. Un ampèremètre indique 9,9 A. La valeur réelle du courant est de 10 A. Déterminer l'erreur et la correction. L'échelle de l'appareil est prévue pour 20 A.

2. Déterminer la résistance d'un shunt pour un ampèremètre à résistance interne de 0,016 ohm, si les indications de l'appareil doivent être augmentées de 5 fois.

3. Un shunt est branché sur un ampèremètre. La résistance du shunt est 25 fois inférieure à celle de l'appareil. Calculer l'intensité du courant qui parcourt le circuit lorsque l'ampèremètre indique 3 A.

4. Avec un voltmètre de 15 V il faut mesurer une tension de 120 V. Calculer la valeur de la résistance additionnelle si la résistance interne du voltmètre est de 2000 ohms.

5. Un fréquencemètre prévu pour la tension de 127 V présente une résistance de 8000 ohms. Quelle doit être la valeur de la résistance additionnelle pour qu'on puisse brancher ce fréquencemètre sur un réseau de 220 volts ?

6. Quelle est l'erreur d'un wattmètre monophasé indiquant 60 watts, la tension étant de 120 V, le courant de 0,6 A et le cos φ de 0,83 ?

7. Un voltmètre est branché par l'intermédiaire d'un transformateur de mesure de 3000/100 V. Calculer la tension du côté haute tension lorsque le voltmètre indique 95 V.

8. Un ampèremètre branché par l'intermédiaire d'un transformateur de courant 150/5 A indique 4 A. Calculer le courant dans le circuit primaire.

9. Un ampèremètre de 10 A dont l'échelle porte 100 divisions est branché par l'intermédiaire d'un transformateur de courant de 500/5 A. L'aiguille de l'ampèremètre se trouve sur la 42ème division. Calculer le courant dans le circuit primaire du transformateur.

10. Un wattmètre triphasé est branché par l'intermédiaire d'un transformateur de tension 3000/100 V et d'un transformateur de courant 50/5 A. Calculer la puissance du circuit primaire lorsque le wattmètre indique 150 W.

11. Un wattmètre de 150 V, 5 A et d'une échelle comportant 150 divisions est branché par l'intermédiaire d'un transformateur de tension 3300/100 V et d'un transformateur de courant 600/5 A. Calculer la puissance du circuit primaire lorsque l'aiguille du wattmètre se trouve sur la 72ème division.

12. Un wattmètre monophasé de 150 V, 5 A et ayant 250 divisions est branché dans un circuit triphasé à charge équilibrée par l'intermédiaire d'un transformateur de tension de 500/100 V et d'un transformateur de courant de 40/5 A. Calculer la puissance du circuit triphasé lorsque l'aiguille du wattmètre se trouve sur la 50ème division.

Questions de contrôle

1. Indiquer les conditions d'équilibre de l'équipage mobile d'un appareil de mesure électrique.

2. Comment peut-on classer les appareils de mesure électriques selon la nature de la grandeur mesurée, la nature du courant, le principe de fonctionnement, la classe de précision ?

3. A quelles exigences doivent répondre les appareils de mesure électriques ?

4. Indiquer l'organisation des appareils de mesure magnéto-électriques, leurs avantages, leurs défauts et les domaines d'emploi.

5. Idem pour les appareils ferromagnétiques.

6. Idem pour les appareils électrodynamiques.

7. Idem pour les appareils thermiques.

8. Idem pour les appareils à induction.

9. Idem pour les appareils à thermocouple.

10. Idem pour les appareils à redresseur.

11. Idem pour les appareils à lames vibrantes.

12. Quelles sont les désignations conventionnelles que l'on trouve sur les cadrans des appareils électriques ?

13. Par quels appareils peut-on mesurer la puissance en courant continu?

14. Faire le schéma de branchement d'un compteur à courant continu.

15. Comment mesure-t-on la puissance en courant alternatif?

16. Faire le schéma de branchement d'un compteur monophasé.

17. Faire le schéma de branchement d'un wattmètre à trois éléments sur un réseau triphasé.

18. Faire le schéma de branchement d'un wattmètre triphasé à deux éléments sur un réseau de haute tension.

19. Comment peut-on mesurer l'énergie réactive?

20. Comment peut-on mesurer le facteur de puissance?

21. Faire le schéma de branchement d'un compteur triphasé d'énergie réactive.

22. Faire le schéma de branchement d'un phasemètre électrodynamique sur un réseau triphasé de haute tension.

23. Comment peut-on mesurer la résistance dans les circuits à courant continu et à courant alternatif?

24. Comment mesure-t-on la résistance d'isolement des fils?

CHAPITRE XV

COMMANDE ÉLECTRIQUE

§ 181. GÉNÉRALITÉS

Chaque machine-outil comporte une partie qui, étant mise en mouvement, exécute par ses outils des opérations qui auparavant étaient faites par un ouvrier à la main à l'aide d'outils analogues.

Cette partie de la machine est appelée mécanisme opérateur. Pour la mise en mouvement de ce mécanisme il faut avoir un moteur et un mécanisme de transmission.

On peut utiliser comme moteur la force de l'homme (commande au pied d'une meule ou d'un tour); la force des animaux (entraînement de certaines machines agricoles); la force du vent, de l'eau et de la vapeur (éoliennes, turbines hydrauliques et à vapeur); les moteurs à combustion interne (tracteurs, automobiles, avions); les moteurs électriques. Le mécanisme de transmission peut comprendre des arbres, des poulies, des roues dentées, des courroies, etc.

Si pour entraîner une machine on utilise un moteur électrique, un tel système de commande est appelé *commande électrique*.

Il existe trois types de systèmes de commande électrique utilisés dans l'industrie: commande générale, commande individuelle et commande à moteurs multiples.

Le système de commande générale comprend un moteur électrique qui par l'intermédiaire d'un système de transmission actionne plusieurs machines.

On utilise parfois comme système de transmission un arbre logé dans des paliers. Cet arbre porte une poulie étagée, une poulie fixe calée sur l'arbre et une poulie folle. Ce système permet de faire varier la vitesse de rotation de la machine (à l'aide de la poulie étagée), d'arrêter et de mettre en marche la machine-outil (à l'aide de la poulie fixe ou la poulie folle). L'arrêt du moteur primaire provoque

l'arrêt de tous les mécanismes entraînés auxquels il fournit l'énergie mécanique. Lorsqu'une partie seulement des mécanismes entraînés est en marche, ce système de commande a un faible rendement.

Le système de commande individuelle comprend un moteur électrique qui actionne un seul mécanisme. Les perceuses monobroches, les tours de faible puissance, etc., sont actionnés par des moteurs individuels. Au début, le mouvement était transmis depuis le moteur à la machine-outil par l'intermédiaire d'une transmission.

Après avoir subi des changements dans sa construction, actuellement, le moteur électrique forme bloc avec le mécanisme actionné.

Le système de commande à moteurs multiples comprend plusieurs moteurs électriques dont chacun sert à actionner un élément séparé de la machine. Les systèmes de commande à moteurs multiples sont utilisés pour actionner les machines-outils de grande puissance, les laminoirs, les machines à papier, les ponts roulants, etc. A titre d'exemple, indiquons le système de commande d'une perceuse radiale. La machine est commandée par quatre moteurs électriques dont le premier actionne la broche, le deuxième soulève et abaisse le bras avec la broche, le troisième fait tourner le bras autour d'un axe vertical et le quatrième refoule le liquide de coupe vers le foret.

Les ponts roulants comportent chacun trois moteurs électriques. Le moteur de levage assure la montée et la descente de la charge, le moteur du charriot déplace ce dernier sur la ferme du pont et le moteur du pont roulant le déplace le long de l'atelier.

§ 182. CARACTÉRISTIQUES DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

D'après la nature de courant on distingue la commande à courant continu et la commande à courant alternatif.

Suivant le mode de connexion de l'enroulement d'induit et de l'enroulement d'excitation on distingue les moteurs à courant continu à excitation en dérivation (shunt), en série et composée (compound).

Nous avons examiné plus haut les moteurs à courant alternatif synchrones et asynchrones. Rappelons que les

moteurs synchrones sont excités par du courant continu venant d'une excitatrice. La vitesse de ces moteurs dépend de la fréquence du courant alternatif. Lorsque la fréquence du courant est constante la vitesse du moteur l'est également.

Les moteurs asynchrones sont excités du côté du circuit primaire par du courant alternatif. La vitesse des moteurs asynchrones varie avec la charge.

La marche d'un moteur est caractérisée par les données nominales indiquées dans sa fiche technique.

Le service nominal d'un moteur est celui qui correspond aux conditions de marche et aux données indiquées dans la fiche.

La puissance nominale P_n d'un moteur est la puissance mécanique développée sur son arbre en service nominal. Elle est indiquée en watts ou en kilowatts dans la fiche.

La vitesse nominale d'un moteur n_n est la vitesse indiquée dans sa fiche et correspondant à son service nominal.

Le couple moteur nominal C_n est le couple développé par le moteur sur son arbre à puissance nominale et à vitesse nominale correspondant au service nominal.

§ 183. SERVICES DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

La durée de service d'une machine dépend de la température maximale à laquelle est soumise son isolation. Lorsque le moteur transforme l'énergie électrique en énergie mécanique il y a un dégagement de chaleur par suite des pertes dans le cuivre, dans le fer et par frottement. La température du moteur augmente. Simultanément avec l'échauffement de différentes pièces du moteur la chaleur est évacuée depuis sa surface dans le milieu ambiant. Lors d'une marche prolongée, la quantité de chaleur dégagée par le moteur et la quantité de chaleur cédée au milieu ambiant deviennent égales, la température du moteur cesse de monter et atteint un état permanent. Pour cette raison, en déterminant la puissance d'une machine, il faut distinguer les trois services suivants:

1. S e r v i c e c o n t i n u. Il est caractérisé par un fonctionnement durant lequel la période de travail est tellement grande que l'échauffement de la machine atteint l'état permanent.

A titre d'exemple du service continu, on peut indiquer le fonctionnement des moteurs actionnant des ventilateurs, des compresseurs, des pompes, des génératrices, etc. La durée de travail de tels moteurs s'exprime en heures et même en jours.

2. Service temporaire. Il est caractérisé par le fait que pendant la période de travail la température du moteur n'arrive pas à atteindre l'état permanent. La pause après la période de travail est tellement grande que

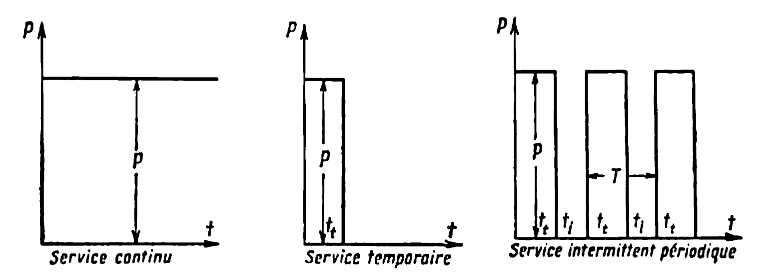


Fig. 383. Graphiques de travail des moteurs en différents services

la température du moteur baisse jusqu'à la température du milieu ambiant. A titre d'exemple du service temporaire, on peut indiquer le travail des moteurs des ponts tournants, des écluses, etc.

3. Service intermittent. Il est caractérisé par l'alternance des périodes de travail et des pauses. La durée d'une période de travail et d'une pause ne doit pas dépasser 10 minutes. Le service intermittent est déterminé par la durée relative de la période de travail par laquelle on entend le rapport de la durée de la période de travail t_t à la durée totale T de la période de travail et de la pause. Par exemple, si pendant la journée de 8 heures, le moteur a travaillé 5 heures, la durée relative de la période de travail est:

$$\frac{t_t}{T} = \frac{5}{8} \cdot 100\,\% = 62{,}5\,\%.$$

La durée relative de la période de travail s'exprime en pour cent et est appelée facteur de charge. Les valeurs normales du facteur de charge sont 15, 25 et 40%. Le facteur de charge est marqué dans la fiche du moteur.

A titre d'exemple du service intermittent, on peut indiquer le travail des moteurs actionnant les ponts roulants, les grues, les ascenseurs, les laminoirs, certaines machines-outils (presses, mortaiseuses, raboteuses).

La figure 383 montre les graphiques de travail des moteurs pour différents services.

§ 184. ISOLEMENT DES MACHINES ÉLECTRIQUES

La puissance d'un moteur est limitée par son échauffement. L'échauffement admissible d'une machine est limité par la résistance à la chaleur des matériaux isolants ainsi que par son système de refroidissement.

Les matériaux isolants utilisés dans les machines électriques se divisent en cinq classes.

Classe A. Elle comprend les tissus en coton, la soie, les fils textiles, le papier et certains autres matériaux organiques imprégnés de différentes huiles ainsi que les émaux et vernis.

Classe B. Elle comprend les articles en mica, amiante et autres substances non organiques avec liants organiques.

Classe BC. Elle comprend le mica, les fils de verre et l'amiante recouverts de vernis réfractaires.

Classe CB. Elle comprend les substances non organiques imprégnées de vernis réfractaires sans utilisation des isolants de la classe A.

Classe C. Elle comprend le mica, la porcelaine, le verre, le quartz et d'autres matériaux non organiques utilisés sans liants.

La température d'échauffement admissible pour les matériaux isolants est: classe A — 105 °C; classe B — 120 °C; classe BC — 135 °C. Pour les isolants de la classe CB elle est un peu supérieure en fonction de la résistance à la chaleur des vernis utilisés, et pour les isolants de la classe C la température n'est pas normalisée.

Pour la température moyenne du milieu ambiant on admet celle de +35 °C.

§ 185. TYPES DES MACHINES ÉLECTRIQUES

D'après le degré de protection contre l'action des agents extérieurs on distingue les types suivants des machines électriques.

1. *Machine ouverte*. Les parties tournantes et les pièces sous tension d'une machine de ce type ne sont pas protégées contre le contact accidentel ni contre la pénétration d'objets étrangers.

2. *Machine semi-protégée*. Les pièces tournantes et les pièces sous tension d'une telle machine sont protégées contre un contact accidentel et la pénétration d'objets étrangers.

3. *Machine abritée*. Les pièces internes d'une telle machine sont protégées contre la pénétration de gouttes d'eau tombant verticalement.

4. *Machine protégée contre les projections d'eau latérales*. Les parties internes d'une telle machine sont protégées contre les gouttes d'eau tombant sous un angle de 45°, par rapport à la verticale.

5. *Machine fermée*. Les pièces internes d'une telle machine sont séparées du milieu extérieur, mais pas suffisamment pour qu'on puisse la considérer comme étant hermétique. Cette machine est utilisée dans les locaux poussiéreux et peut être installée à l'extérieur.

6. *Machine protégée contre les jets d'eau*. L'espace interne d'une telle machine est protégé contre la pénétration de l'eau lorsque la machine est arrosée à la lance. Les machines de ce type sont utilisées à bord des navires.

7. *Machine antidéflagrante*. C'est une machine fermée exécutée de façon à pouvoir résister aux explosions à son intérieur des gaz contenus dans le milieu extérieur. Les fentes par lesquelles l'espace interne de la machine communique avec le milieu ambiant sont de telles dimensions qu'en cas d'explosion à l'intérieur de la machine la flamme ne peut pas sortir hors de la machine. Les machines antidéflagrantes sont utilisées dans les mines de charbon et dans certaines usines chimiques.

8. *Machine hermétique*. C'est une machine complètement fermée dans laquelle toutes les ouvertures sont obturées de façon que jusqu'à une certaine pression extérieure toute communication est exclue entre l'espace interne de la machine et le milieu gazeux ou liquide entourant la machine.

§ 186. REFROIDISSEMENT DES MACHINES ÉLECTRIQUES

Selon le mode de refroidissement les machines se divisent en classes suivantes.

1. Machines à refroidissement naturel sans ventilateurs spéciaux. La circulation de l'air nécessaire au refroidissement est assurée par l'action des parties tournantes de la machine et par le phénomène de convection. Ce type de refroidissement est utilisé dans les machines ouvertes.

2. Machines à ventilation artificielle dans lesquelles la circulation du gaz (généralement de l'air) refroidissant les pièces réchauffées est renforcée par un ventilateur spécial. Cette classe comprend:

a) les machines autorefroidies dont le ventilateur est calé sur l'arbre (machines protégées ou fermées);

b) les machines à refroidissement séparé dont le ventilateur est actionné par un autre moteur (machines fermées).

Les machines de faible et moyenne puissance, fonctionnant dans des locaux suffisamment vastes dans lesquels l'air est propre, aspirent l'air dans le local et le refoulent dans le même local.

Les machines fermées fonctionnant dans des locaux à air pollué aspirent l'air venant de l'extérieur par une conduite et le refoulent dans le local où elles sont installées.

Afin d'éviter l'échauffement excessif du local, les machines fermées à grande puissance aspirent l'air de l'extérieur par une conduite et le refoulent également à l'extérieur par une autre conduite.

Les machines ventilées en circuit fermé ont un volume constant d'air de circulation (ou d'un autre gaz, par exemple d'hydrogène). Après son passage par la machine, le gaz est dirigé vers un réfrigérant.

§ 187. CLASSIFICATION DES MOTEURS D'APRÈS LEUR CARACTÉRISTIQUE MÉCANIQUE

Selon le mode de variation de la vitesse d'un moteur en fonction de la charge, on peut classer les moteurs de façon suivante.

1. Moteurs à vitesse constante dont la vitesse de rotation ne dépend pas de la charge (moteur synchrone).

2. Moteurs à caractéristique shunt dont la vitesse change peu avec la variation de la charge appliquée à l'arbre (moteurs à courant continu à excitation en dérivation, moteurs asynchrones).

3. Moteurs à caractéristique série. Leur vitesse décroît fortement lorsque la charge augmente (moteurs série à courant continu).

4. Moteurs à plusieurs vitesses (moteurs asynchrones et synchrones à commutation du nombre de paires de pôles).

5. Moteurs à réglage de la vitesse dans lesquels, pour la même charge, on peut faire varier la vitesse dans certaines limites (moteurs à courant continu à réglage de courant d'excitation, moteurs asynchrones à rotor bobiné avec rhéostat de réglage dans le circuit rotorique).

§ 188. CHOIX DE LA PUISSANCE DES MOTEURS

Le travail de chaque mécanisme entraîné est caractérisé:

1. Par la valeur de la force résistante F qu'on doit vaincre.

2. Par la vitesse de rotation v ou par le nombre de tours n ou la vitesse angulaire ω des pièces du mécanisme.

3. Par la puissance utile P_u et la puissance absorbée P_a. Lors du travail du mécanisme entraîné à vitesse constante, seules les résistances statiques comprenant la résistance utile et la résistance nuisible (frottement, résistance du milieu, etc.) sont vaincues. Lors d'un mouvement non uniforme la résistance totale comprend en plus de la résistance statique la résistance dynamique due à l'inertie des masses en mouvement.

Lors d'un mouvement rotatif, les forces résistantes peuvent être remplacées par des couples

$$C = C_s + C_d,$$

où C est le couple résistant total;

C_s est le couple résistant statique;

C_d est le couple résistant dynamique (inertie des masses tournantes).

Les couples sont généralement exprimés en kilogrammes-mètres (kgfm).

Le couple résistant statique C_s comprend le couple résistant utile C_u et le couple des forces de frottement C_f :

$$C_s = C_u + C_f \text{ kgfm.}$$

On sait du cours de physique que lors d'un mouvement rotatif uniforme la puissance P_r est égale au produit du couple moteur C_m par la vitesse angulaire ω :

$$P_r = C_s\omega \text{ kgfm/s},$$

où

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60},$$

où n est le nombre de tours par minute.

Puisque 1 kW = 1,36 ch ou 1 kW = 1,36·75 = 102 kgfm/s, on a :

$$P_r = \frac{C_s 2\pi n}{60 \cdot 102} \approx \frac{C_s n}{975} \text{ kW.}$$

En cas d'accroissement de la vitesse du mécanisme entraîné il faut dépenser une certaine puissance pour l'accélération des pièces tournantes. Inversement, lors de la diminution de la vitesse, la puissance est fournie par les pièces tournantes du mécanisme et dans certains cas elle est utilisée, par exemple, pour diminuer les pointes de charge (volants) ou bien elle est récupérée par le réseau.

Le choix correct de la puissance d'un moteur a une grande importance. Une puissance insuffisante n'assure pas le travail normal du mécanisme entraîné, diminue la productivité du travail et provoque un échauffement dangereux du moteur.

Une puissance excessive d'un moteur diminue le rendement de l'installation. Avec les moteurs à courant alternatif elle diminue le facteur de puissance, augmente le prix de l'installation et cause de grandes pertes d'énergie.

Considérons plusieurs cas de calcul de la puissance d'un moteur pour différentes charges (lors du calcul de la puissance on ne tient pas compte de l'inertie des masses tournantes; le calcul est fait en partant de l'hypothèse que lors du fonctionnement du mécanisme entraîné la vitesse ne change pas, des démarrages fréquents n'ont pas lieu et la mise en marche se fait à vide).

1. Tours. La puissance du moteur pour un tour peut être calculée d'après la formule :

$$P = \frac{F_c v_c}{60 \cdot 102 \eta} \text{ kW},$$

où F_c est l'effort de coupe en kgf ;
v_c est la vitesse de coupe en m/mn ;
η est le rendement du tour.

Parfois, pour calculer la puissance du moteur, on utilise l'expression des couples moteurs (couples doubles, pour faciliter le calcul) :

$$2C = F_c d \text{ kgfm},$$

où F_c est l'effort de coupe en kgf ;
d est le diamètre de la pièce usinée en m.

Dans ce cas, la puissance du moteur est déterminée d'après la formule suivante :

$$P = \frac{2C_c n}{2 \cdot 975 \eta} \text{ kW}.$$

Pour la commande des tours et d'autres machines-outils destinées à l'usinage des métaux par enlèvement de matière, on utilise des moteurs asynchrones triphasés commandés par boutons-poussoirs.

2. Perceuses. La puissance du moteur pour une perceuse peut être calculée d'après la formule :

$$P = \frac{2C_c n}{2 \cdot 975 \eta} \text{ kW},$$

où $2C_c$ est le double couple moteur de coupe au foret en kgfm ;
n est la vitesse de rotation du foret en tr/mn ;
η est le rendement de perceuse.

Pour commander les perceuses on utilise des moteurs asynchrones triphasés.

3. Autres machines à usiner les métaux. Ce sont des raboteuses (la pièce usinée, fixée sur la table, est animée d'un mouvement alternatif, l'outil étant fixe) ; des étaux-limeurs (la table avec la pièce usinée est fixe, tandis que l'outil est animé d'un mouvement alternatif) ; des mortaiseuses (elles ne diffèrent pas des étaux-limeurs, mais l'outil se déplace dans le plan vertical) ; des machines spéciales à tailler les dents.

La puissance du moteur et l'effort de coupe pour ces machines sont déterminés de la même façon que pour les tours.

4. Pompes hydrauliques. La puissance d'un moteur pour les pompes hydrauliques est déterminée par la formule :

$$P = \frac{Q\gamma H}{102\eta_p\eta_t} \text{ kW},$$

où Q est le débit de la pompe en m^3/s;

γ est le poids du liquide en kgf/m^3;

H est la hauteur de refoulement total en m;

η_p est le rendement de la pompe;

η_t est le rendement de la transmission entre la pompe et le moteur.

Le débit des pompes à piston peut être déterminé par la formule

$$Q = k\frac{\pi D^2 ln}{4 \cdot 60} \text{ m}^3/s,$$

où k est le coefficient de remplissage du cylindre avec de l'eau (généralement $k = 0,9$);

l est la course du piston en mètres;

D est le diamètre du piston en mètres;

n est le nombre de courses par minute, la pompe étant à simple effet.

La hauteur de refoulement totale (théorique) de l'eau est :

$$H = h_a + h_r + h_c,$$

où h_a est la hauteur d'aspiration;

h_r est la hauteur de refoulement;

h_c est la hauteur qui correspond à la perte de charge (déterminée en mètres de colonne d'eau par 100 m courants de la longueur de conduite et que l'on trouve dans les aide-mémoire).

5. Compresseurs. La puissance du moteur d'un compresseur est calculée d'après la formule :

$$P = \frac{AQ}{102\eta_p\eta_t},$$

où A est le travail nécessaire pour comprimer 1 m^3 d'air jusqu'à la pression requise, en kgfm;

Q est le débit du compresseur en m^3/s.

Tableau 18

Principaux systèmes de commande électrique

Système	Nature et gamme de réglage	Domaine d'emploi
Moteurs asynchrones à rotor en court-circuit :		
à glissement normal	Non réglables	Commande des machines de petite et de moyenne puissance sans réglage de vitesse, à faible fréquence de mise en marche
à glissement augmenté	Non réglables	Idem, mais à grande fréquence de mise en marche ainsi que dispositifs de commande à volant
à nombre de pôles variable	Réglage par échelons ne dépassant pas 6 : 1	Dispositifs de commande admettant le réglage électrique échelonné de la vitesse (par exemple, certaines machines-outils de faible puissance et presses)
Moteurs asynchrones à bagues	Réglage relativement progressif à couple résistant constant, ne dépassant pas 2 : 1	Ponts roulants, ventilateurs auxiliaires pour usines métallurgiques, aspirateurs de fumée
Réglage par rhéostat	Réglage relativement progressif pour un couple résistant dit de ventilateur dans un rapport de 4 : 1 et plus	(idem)
Moteurs dérivation à courant continu alimentés par un réseau à courant continu	Progressif, dans un rapport ne dépassant pas 4 : 1	Principalement pour la commande des machines-outils pour travailler les métaux par enlèvement de matière
Moteurs dérivation alimentés suivant le système Ward-Léonard (générateur-moteur)	Réglage progressif, dans un rapport de 100 : 1 et plus	Pour mécanismes demandant une large gamme de réglage de la vitesse ou un renversement de marche fréquent (par exemple, machines-outils, laminoirs réversibles, machines à papier, etc.)

Système	Nature et gamme de réglage	Domaine d'emploi
Moteurs dérivation alimentés par un convertisseur ionique	Réglage progressif, dans un rapport non supérieur à 60 : 1	Laminoirs non reversibles et certaines machines-outils à réglage électrique de la vitesse
Moteurs série (à courant continu)	Réglage relativement progressif, dans un rapport non supérieur à 3 : 1	Ponts roulants demandant une haute précision et une faible vitesse avec des caractéristiques série ; largement utilisés pour la traction électrique
Moteurs synchrones	Non réglables	Gros compresseurs et pompes, groupes électrogènes, commande principale des laminoirs continus non réglables ; moyennes et grosses machines de production de papier et de ciment

Nous avons examiné plusieurs exemples de calcul de la puissance du moteur pour différentes machines travaillant en service continu avec une charge constante ou peu variable.

D'après la puissance calculée on trouve dans les catalogues les moteurs dont la puissance correspond à la charge donnée.

Le tableau 18 indique les principaux systèmes de commande électrique, leur emploi et les gammes de réglage de la vitesse.

§ 189. PROTECTION DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

Lors du travail des moteurs électriques, différentes perturbations du régime normal sont possibles. Afin de prévenir la destruction de l'isolation ainsi que des enroulements et des connexions, les moteurs doivent être munis de dispositifs de protection assurant leur débranchement à temps utile.

Les causes les plus fréquentes des régimes anormaux d'un moteur sont: les surcharges, les courts-circuits, la baisse ou la disparition de la tension d'alimentation.

On appelle *surcharge* l'accroissement du courant absorbé par le moteur au-dessus de la valeur nominale. Les surcharges peuvent être faibles et de courte durée. Elles ne présentent alors aucun danger pour le moteur et le système de protection ne doit pas répondre à ces surcharges. Mais les surcharges peuvent aussi être excessives et de longue durée. Dans ce cas, elles sont dangereuses pour les enroulements du moteur, car la grande quantité de chaleur dégagée peut carboniser les isolants et brûler les enroulements.

Les courts-circuits qui peuvent avoir lieu dans les enroulements d'un moteur sont également dangereux pour celui-ci. La protection des moteurs contre les surcharges et les courts-circuits est appelée *protection à maximum de courant*. Elle est assurée par des coupe-circuit à fusible, par des relais de courant et des relais thermiques. Le choix d'un tel ou tel dispositif de protection dépend de la puissance, du type et de la destination du moteur, des conditions de démarrage et de la nature des surcharges éventuelles.

§ 190. PROTECTION DES MOTEURS PAR COUPE-CIRCUIT

Les coupe-circuit sont des dispositifs avec fil fusible de cuivre, de zinc ou de plomb fixé sur un socle isolant. Les coupe-circuit sont destinés à débrancher le récepteur (une partie de l'installation d'éclairage, un moteur, etc.) du réseau en cas d'une charge excessive ou d'un court-circuit. La grande quantité de chaleur dégagée fait fondre l'élément fusible du coupe-circuit en interrompant le circuit électrique. Bien qu'étant les plus répandus, les coupe-circuit sont des dispositifs de protection très imparfaits.

Le pouvoir de coupure des coupe-circuit est relativement faible. La puissance maximale qu'un coupe-circuit ou un autre appareil de disjonction (par exemple, un disjoncteur) peut couper sans risque d'être endommagé est appelée *pouvoir de coupure*.

La fusion de l'élément fusible du coupe-circuit est accompagnée d'un dégagement de flamme et de gaz surchauffés qui peuvent être la cause de brûlures et d'incendie.

Les coupe-circuit peuvent supporter indéfiniment une surcharge de 25%, pendant une heure une surcharge de 60 % et pendant deux minutes environ une surcharge de 80 %.

Ainsi, les coupe-circuit ne peuvent pas protéger un moteur contre de faibles surcharges de longue durée de sorte que le moteur peut être mis hors service, tandis que l'élément fusible reste intact. Ce n'est que lors de grandes et brusques surcharges ou des courts-circuits que les coupe-circuit peuvent débrancher rapidement le moteur.

Il peut paraître qu'en adoptant un coupe-circuit prévu pour un courant inférieur au courant nominal du moteur on peut protéger ce dernier contre les surcharges. Mais en réalité il n'en est pas ainsi. On sait que le courant de démarrage d'un moteur est de beaucoup supérieur au courant nominal (par exemple, le courant de démarrage d'un moteur asynchrone à rotor en court-circuit est de 5 à 7 fois supérieur au courant nominal). Les coupe-circuit prévus pour un faible courant sauteraient à l'instant de démarrage du moteur.

Pour choisir le courant nominal de l'élément fusible on utilise la formule suivante:

$$I_f \geqslant \frac{I_d}{2,5},$$

où I_f est le courant de l'élément fusible;

I_d est le courant de démarrage du moteur.

Cette expression est valable pour les moteurs dont le temps de mise en vitesse ne dépasse pas 5 à 10 secondes (conditions normales de démarrage). Si le démarrage dure 30 à 40 secondes (démarrage pénible), le choix du courant du coupe-circuit se fait en partant de la condition:

$$I_f \geqslant \frac{I_d}{1,6 \text{ à } 2}.$$

Les coupe-circuit peuvent être *à bouchon*, *à lame* et *tubulaires*. Les coupe-circuit à bouchon sont fabriqués pour des tensions ne dépassant pas 500 V et pour des courants de 2 à 60 A et sont employés pour la protection des réseaux d'éclairage et des moteurs de faible puissance.

Les coupe-circuit à lame qui présentent de grands défauts (projection du métal fondu de l'élément fusible lors de la fusion, difficultés de remplacement) sont actuellement peu utilisés.

Les coupe-circuit tubulaires de basse tension sont fabriqués pour des tensions ne dépassant pas 500 V et pour des courants compris entre 6 et 1000 A. Ces coupe-circuit peu-

vent être fabriqués avec un tube de porcelaine ouvert (type СПО) ou avec un tube fermé de verre, de fibre ou de porcelaine. Les tubes par lesquels passe l'élément fusible sont souvent remplis de sable de quartz (type ПН). A l'instant de fusion de l'élément fusible, le sable divise l'arc électrique en plusieurs petits arcs et refroidit l'arc qui s'éteint rapidement.

Actuellement, on utilise largement des coupe-circuit tubulaires à générateur de gaz du type ПР (fig. 384) comprenant un tube de fibre *1* fermé de deux côtés par des chapeaux en laiton *3*. A l'intérieur du tube est placé l'élément fusible *4* en alliage de zinc. Le coupe-circuit est introduit dans les contacts à mâchoires *2*.

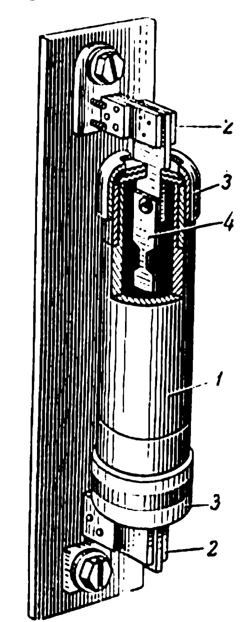


Fig. 384. Coupe-circuit tubulaire

Le coupe-circuit de ce type fonctionne de façon suivante. A l'instant où l'élément fusible fond, une partie de la surface interne du tube de fibre se décompose sous l'action de la haute température de l'arc. Le gaz qui est dégagé contient une grande quantité d'hydrogène sous haute pression déionisant l'arc électrique qui s éteint rapidement.

Les coupe-circuit du type ПР ont un grand pouvoir de coupure et ne présentent aucun danger en service.

On appelle pouvoir de coupure d'un appareil la puissance maximale qu'il peut couper.

§ 191. PROTECTION DES MOTEURS ÉLECTRIQUES PAR DISJONCTEURS

Dans les circuits électriques à courant continu ou alternatif dont la tension de dépasse pas 500 V on utilise des disjoncteurs à coupure dans l'air.

Les disjoncteurs sont destinés à couper le circuit électrique en cas de surcharge ou de courts-circuits.

Dans les circuits à courant alternatif on utilise des disjoncteurs de la série A-2000 et dans les circuits à courant continu des disjoncteurs de la série AB-45-1. Les disjonc-

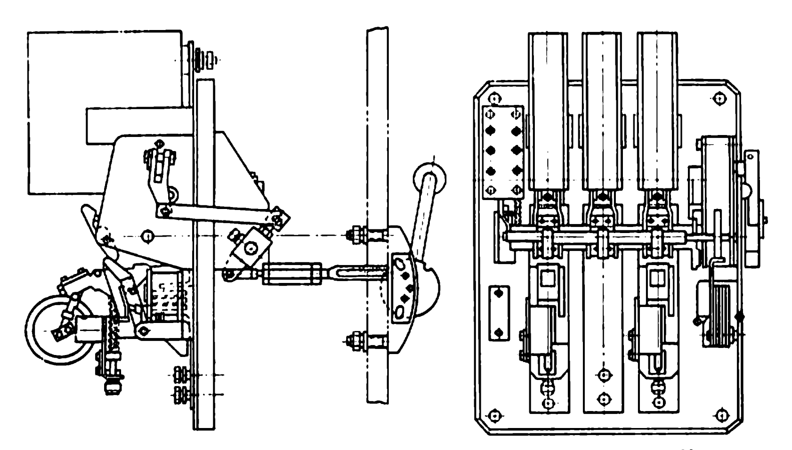


Fig. 385. Schéma d'un disjoncteur à coupure dans l'air

teurs diffèrent l'un de l'autre par la valeur du courant nominal.

Les disjoncteurs peuvent être unipolaires, bipolaires et tripolaires à commande manuelle et à commande à distance. Le schéma d'un disjoncteur A-2050 est montré sur la figure 385.

§ 192. PROTECTION DES MOTEURS ÉLECTRIQUES PAR RELAIS THERMIQUES

Nous avons examiné au § 53 le principe de fonctionnement d'un relais thermique bilame. La figure 386 montre le schéma d'un relais thermique incorporé dans les contacteurs-disjoncteurs (voir § 198).

La pièce principale du relais est formée par une bilame *1*. Sous l'action de la chaleur de l'élément chauffant *2*, la bilame se déforme et, en se pliant, libère le verrou *3*. Sous l'action du ressort *4*, le verrou tourne sur son axe et par le tirant *5* ouvre les contacts normalement fermés *6* du circuit auxiliaire du relais. Le retour du verrou dans sa position initiale se fait à l'aide d'un bouton de retour.

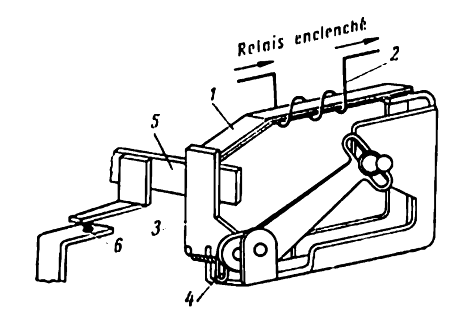
Dans certains relais thermiques la bilame est chauffée par le courant du moteur.

Les relais thermiques à bilame sont fabriqués pour des courants compris entre 0,5 et 600 A.

L'élément chauffant d'un relais thermique est choisi d'après le courant nominal du moteur.

Les relais thermiques protègent les moteurs contre les surcharges, mais ils ne peuvent pas débrancher le moteur en cas d'un court-circuit. Ceci s'explique par le fait que dans ce dernier cas le moteur doit être débranché instantanément, tandis que l'échauffement de la bilame exige un certain temps.

La température du milieu ambiant influe considérablement sur le fonctionnement d'un relais thermique. Pour cette raison, le relais doit se trouver dans les mêmes conditions de température que le moteur à protéger, c'est-à-dire que le relais doit être installé dans le même local et près du moteur.



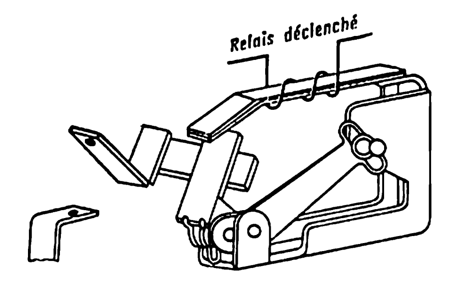


Fig. 386. Organisation schématique d'un relais thermique

§ 193. APPAREILS DE COMMANDE DES MOTEURS

La commande des moteurs à tension ne dépassant pas 500 V peut être faite à la main, semi-automatiquement et automatiquement.

La commande à la main consiste à fermer ou à ouvrir le circuit du moteur à l'aide d'un interrupteur à couteaux ou d'un autre type.

Avec la commande semi-automatique, la mise en marche du moteur se fait à l'aide d'un appareil dont les circuits d'enclenchement sont fermés à l'aide d'un bouton-poussoir.

La commande automatique d'un moteur se fait soit par le mécanisme entraîné lui-même ou à l'aide d'un mécanisme spécial qui assure la mise en marche et l'arrêt du moteur aux moments voulus.

Pour commander les moteurs électriques on utilise divers appareils de démarrage et de réglage.

§ 194. INTERRUPTEURS À COUTEAUX, COMMUTATEURS, INTERRUPTEURS ROTATIFS

Pour la commande manuelle des moteurs électriques à courant continu ou alternatif dont la tension ne dépasse pas 500 V on utilise des interrupteurs à couteaux et des commutateurs. Suivant le nombre de couteaux ces interrupteurs et commutateurs peuvent être unipolaires, bipolaires ou tripolaires.

La commande des interrupteurs et des commutateurs peut se faire à l'aide d'une poignée ou d'un dispositif à levier. Dans le premier cas, les interrupteurs sont montés sur la face avant du tableau et dans le second cas, à l'arrière du tableau et sont actionnés par la poignée du dispositif à levier disposée sur la face avant du tableau.

Un interrupteur bipolaire ou tripolaire sans couteaux auxiliaires comprend 2 ou 3 couteaux réunis entre eux par une traverse isolante avec poignée. Chaque couteau tourne dans un contact inférieur. Lors de la fermeture, les couteaux entrent par leur partie supérieure dans le contact supérieur et après l'ouverture ils sont retenus en position horizontale par un dispositif spécial.

Un interrupteur à couteaux auxiliaires comporte des couteaux auxiliaires réunis aux couteaux principaux par des ressorts. A l'instant de l ouverture, les couteaux principaux quittent d'abord les contacts supérieurs et ensuite, sous l'action des ressorts, les couteaux auxiliaires sont débranchés rapidement. L'arc électrique qui apparaît à l'endroit de coupure s'éteint rapidement et les couteaux s'usent moins.

Selon les règles de sécurité, les interrupteurs à 380 et à 500 V doivent avoir une enveloppe protectrice ou être commandés par un dispositif à levier.

En U.R.S.S. on fabrique des interrupteurs à poignée des modèles suivants: PO-3 (pour 100 à 400 A), PO-5 (pour 600 à 1000 A), PO-7 (pour 1500 A). Les commutateurs à poignée sont fabriqués en modèles suivants: ПО-3 (pour 100 à 400 A) et ПО-5 (pour 100 à 600 A). Les interrupteurs et les commutateurs à commande par levier sont de types: РПО-3, РПО-5, ППО-3 et ППО-5 pour courants de 100 à 1000 A.

La figure 387 montre un commutateur à couteaux auxiliaires et la figure 388 un interrupteur à couteaux commandé par levier.

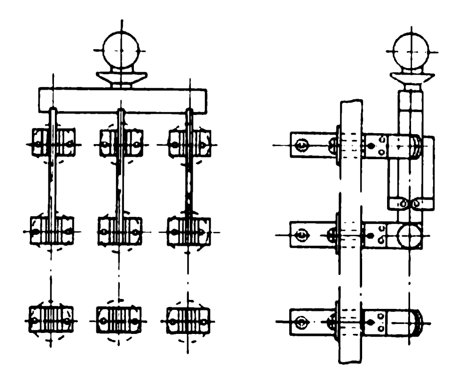


Fig. 387. Commutateur à couteaux

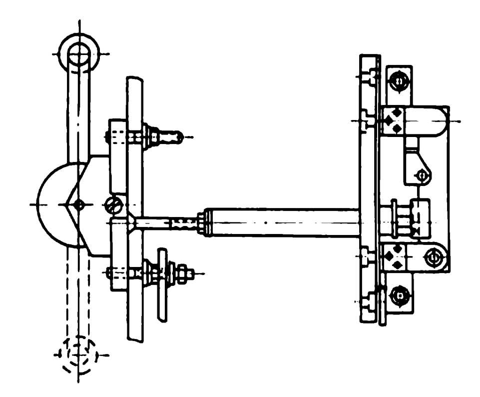


Fig. 388. Interrupteur à couteaux commandé par levier

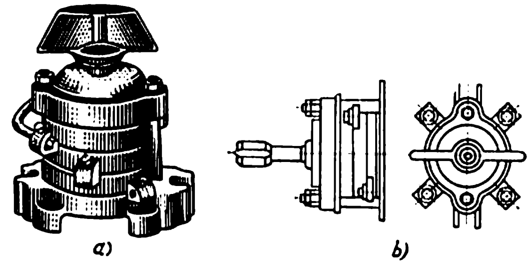


Fig. 389. Interrupteur rotatif (*a* — vue d'ensemble ; *b* — schéma)

Pour établir et interrompre à la main les circuits électriques à courant continu sous une tension ne dépassant pas 250 V et à courant alternatif sous une tension ne dépassant pas 380 V on utilise des interrupteurs rotatifs du type ПК (fig. 389). L'interrupteur se compose d'éléments ronds séparés faits en matériau isolant (matière plastique). A l'intérieur de l'élément tourne un contact mobile qui ferme ou ouvre le circuit. Plusieurs éléments sont réunis et serrés par des goujons.

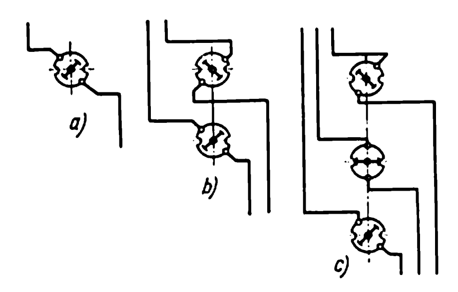


Fig. 390. Schémas de branchement des interrupteurs rotatifs

Ces interrupteurs peuvent être unipolaires, bipolaires ou tripolaires pour des courants de 6 à 100 A.

Les schémas de montage des interrupteurs rotatifs unipolaires, bipolaires et tripolaires sont représentés à la figure 390, *a*, *b*, *c*.

§ 195. CONTACTEURS

Pour la commande automatique et la commande à distance des moteurs on utilise des contacteurs à courant continu et à courant alternatif.

Le schéma d'un contacteur à courant continu est représenté sur la figure 391. Le circuit de puissance fermé par le contacteur passe par les contacts *1* et *2* fixés sur un socle isolant *3*, les contacts *4* et *5* du contacteur lui-même et la jonction flexible *6*. La fermeture du contacteur est réalisée par l'électro-aimant *7* dont l'enroulement est alimenté par le circuit auxiliaire de commande. En cas de fermeture du circuit de commande, l'électro-aimant attire l'armature *8* qui ferme les contacts du contacteur.

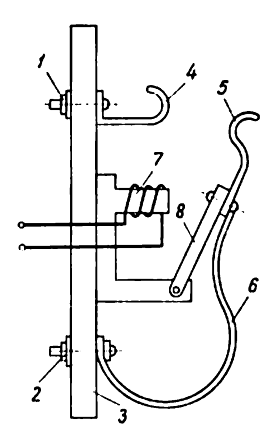


Fig. 391. Schéma d'un contacteur à courant continu

Le contacteur est maintenu fermé tant que le circuit d'enroulement de l'électro-aimant est fermé. Les contacteurs à courant continu du type KП sont fabriqués à un, deux ou trois contacts principaux prévus pour des circuits à courant continu de 220, 440 et 600 V. Les courants nominaux pour lesquels sont prévus les contacts principaux sont

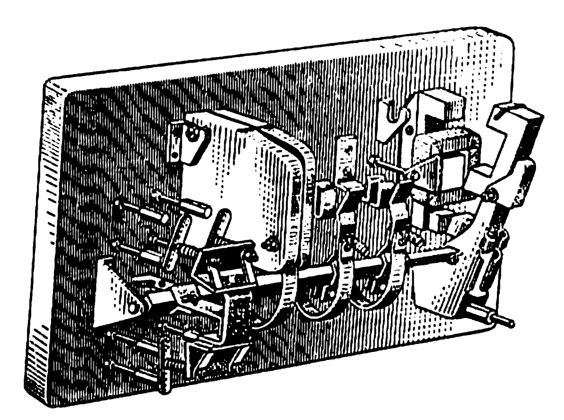


Fig. 392. Contacteur à courant alternatif

compris entre 20 et 250 A. Les bobines des électro-aimants de ces contacteurs sont prévues pour les tensions de 48, 110 et 220 V.

En plus des contacts principaux servant à la fermeture et à l'ouverture des circuits de puissance, les contacteurs sont munis de contacts de verrouillage pour les circuits de signalisation et pour d'autres buts.

Les contacteurs KП admettent de 240 à 1200 opérations par heure.

Le schéma d'un contacteur à courant alternatif du type KT est indiqué sur la figure 392. Les bobines de fermeture des contacteurs KT sont prévues pour les tensions de 127, 220, 380 et 500 V, 50 Hz. Les contacteurs KT admettent 120 opérations par heure.

§ 196. COMBINATEURS

Pour le démarrage des moteurs, le changement de leur sens de rotation, le réglage de la vitesse et l'arrêt on utilise des appareils appelés *combinateurs*. Selon la nature du cou-

rant les combinateurs sont à courant continu et à courant alternatif. Les combinateurs dont les contacts sont branchés dans le circuit de puissance des moteurs sont appelés *combinateurs de puissance*.

Il existe des combinateurs qui ferment les circuits de commande des appareils électromagnétiques (par exemple, des contacteurs), lesquels à leur tour ferment ou ouvrent les circuits de puissance des moteurs. Ces combinateurs sont appelés *combinateurs auxiliaires*.

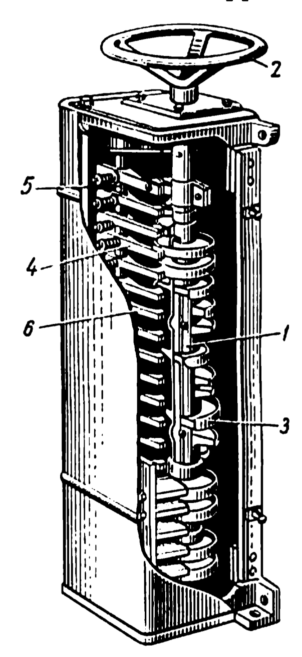


Fig. 393. Combinateur à tambour:

1 — arbre; 2 — volant; 3 — lame de cuivre; 4 — contacts fixes; 5 — planchettes isolantes; 6 — lardons de cuivre

Selon la construction du système de contact, les combinateurs sont *à tambour* ou *à cames*.

La figure 393 représente un combinateur à tambour. L'arbre du combinateur *1* est actionné à l'aide du volant *2*. Sur l'arbre sont fixées des lames de cuivre *3* en forme de segment et qui jouent le rôle de contacts mobiles. Ces lames sont isolées de l'arbre. Les segments peuvent être de différente longueur et sont décalés l'un par rapport à l'autre d'un certain angle. Certains segments sont liés électriquement entre eux. Lorsqu'on tourne l'arbre du combinateur, les segments touchent les contacts fixes *4* montés sur une planchette isolante *5*. Les contacts fixes à doigt s'achèvent par des lardons *6* faciles à changer. Par connexion des contacts mobiles avec les contacts fixes les commutations nécessaires ont lieu dans le circuit commandé.

Afin de prévenir le passage de l'arc électrique d'un doigt à un autre, ils sont séparés par des cloisons en amiante-ciment. Pour l'extinction de l'arc, les combinateurs comportent une bobine de soufflage dont l'action est basée sur l'interaction d'un conducteur parcouru par un courant et du champ magnétique. A l instant où l'arc se forme celui-ci se trouve dans le champ magnétique de la bobine. Un effort

est alors créé qui oblige l'arc à dévier de côté de sorte qu'il s'allonge, se refroidit fortement et puis s'éteint.

Un combinateur à cames comprend un jeu d'éléments à contacts qui se ferment et s'ouvrent sous l'action des disques à cames situés sur l'arbre du combinateur. Le schéma du système de contacts d'un combinateur à cames est montré sur la figure 394.

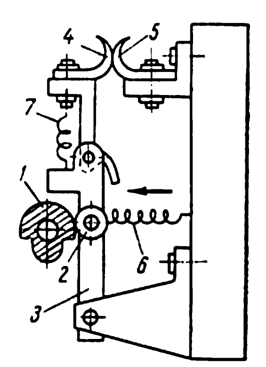


Fig. 394. Schéma d'un combinateur à cames:

1 — disque à cames; *2* — galet; *3* — levier; *4*, *5* — contacts; *6* — ressort de commande; *7* — ressort de pression

Lorsqu'on tourne l'arbre du combinateur, le disque à cames *1* calé sur l'arbre tourne d'un certain angle et appuie sur le galet *2* fixé par articulation sur le levier *3*. La rotation du levier (sur la fig. 394, vers la droite) provoque la fermeture des contacts *4* et *5*. A l'instant où les contacts se touchent, le contact mobile, en roulant, commence à glisser sur le contact fixe. Le rodage des contacts a lieu durant lequel l'oxyde est enlevé des surfaces de contact. Le ressort *6* fait appuyer le galet contre la surface du disque à cames. La pression de contact est assurée par le ressort *7*.

Pour améliorer l'extinction de l'arc, chaque élément du combinateur est muni d'un dispositif individuel pour le soufflage de l'arc.

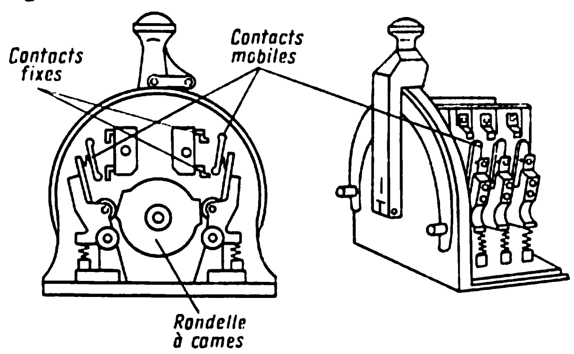


Fig. 395. Combinateur auxiliaire

Les contacts des combinateurs à cames ont un pouvoir de coupure plus grand que ceux des combinateurs à

tambour et admettent un plus grand nombre d'opérations (jusqu'à 600 par heure).

La figure 395 représente un combinateur auxiliaire de la série KA-5000. Le principe de fonctionnement de ce combinateur est analogue à celui du combinateur à cames. Les combinateurs auxiliaires ont de 2 à 14 circuits principaux et de 1 à 7 positions de service.

§ 197. BOUTONS DE COMMANDE

Pour la commande à distance des appareils électromagnétiques ainsi que dans les circuits de signalisation on utilise des boutons de commande du type KУ-121. Les boîtes à boutons comprennent 1, 2 ou 3 éléments à bouton.

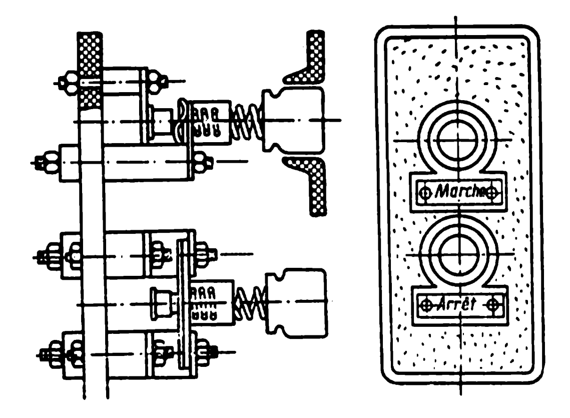


Fig. 396. Boutons de commande

Chaque élément à bouton a un contact normalement ouvert et un contact normalement fermé. On appelle conventionnellement *position normale des contacts* la position pour laquelle l'action extérieure sur le bouton est absente.

La tension nominale pour laquelle on prévoit l'emploi des boutons de commande ne doit pas dépasser 440 V en courant continu et 500 V en courant alternatif. La figure 396 représente une boîte à deux boutons.

§ 198. CONTACTEURS-DISJONCTEURS

Les contacteurs-disjoncteurs (ou plus précisément, les contacteurs à ouverture automatique) sont des appareils électromagnétiques servant à commander à distance les

moteurs asynchrones triphasés. Ils comportent deux circuits: un circuit principal (de puissance) et un circuit auxiliaire (de commande).

Le circuit principal comprend des coupe-circuit, des contacts de ligne et des éléments chauffants des relais thermiques.

Par le circuit de puissance l'énergie du courant triphasé arrive dans l'enroulement statorique du moteur commandé.

Le circuit de commande comprend une boîte à deux boutons « marche » et « arrêt », une bobine d'enclenchement

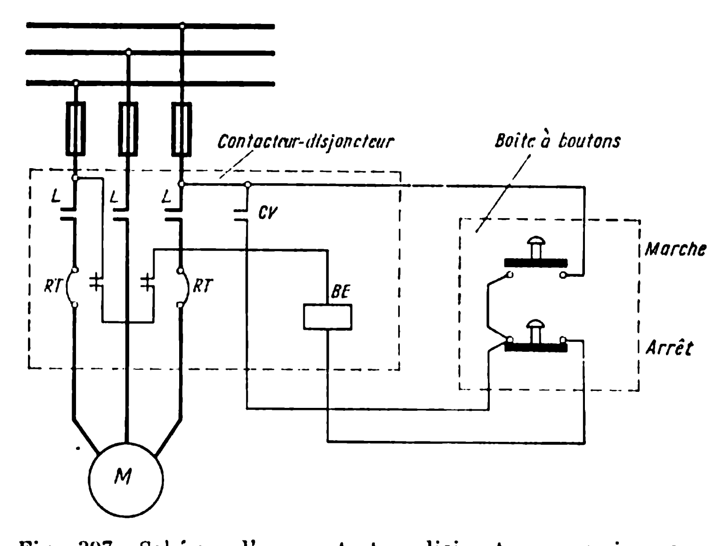


Fig. 397. Schéma d'un contacteur-disjoncteur non inverseur:
L — principaux contacts de ligne; *RT* — relais thermiques; *CV* — contacts de verrouillage; *BE* — bobine de l'électro-aimant d'enclenchement; *M* — moteur électrique

du contacteur, un contact de verrouillage et des contacts des relais thermiques. Le circuit de commande sert à commander le contacteur-disjoncteur lui-même.

La figure 397 représente le schéma d'un contacteur-disjoncteur non réversible du type ПМ commandé par boutons-poussoirs.

Le contacteur-disjoncteur fonctionne de façon suivante. Lorsqu'on appuie sur le bouton « marche », le courant de première phase passe par le bouton « marche », par une

barrette de jonction, par le bouton « arrêt » qui enclenche la bobine *BE*, les contacts des relais thermiques *RT* et arrive à la troisième phase. La bobine attire l'armature, les contacts principaux *L* se ferment, le moteur est mis sous tension et commence à tourner. En se fermant simultanément avec la fermeture des contacts principaux *L* les contacts de verrouillage *CV* shuntent le bouton « marche » que l'on peut alors lâcher. Le courant alimentant la bobine d'enclenchement passe de la première phase par les contacts de verrouillage *CV*, le bouton « arrêt », etc. On arrête le moteur en appuyant sur le bouton « arrêt ». Les contacts principaux s ouvrent alors et le moteur s'arrête. La protection du moteur contre les surcharges est assurée par des relais thermiques dont les éléments chauffants sont choisis en fonction du courant nominal du moteur. Lorsque l enroulement du moteur est traversé par un courant dépassant le courant nominal les relais thermiques ouvrent leurs contacts, ce qui fait couper le circuit de la bobine d'enclenchement, les contacts principaux s'ouvrent et le moteur s'arrête automatiquement.

Le bouton de « retour » sert à faire revenir les contacts des relais thermiques en position initiale.

Après l'ouverture du contacteur-disjoncteur sous l'action des relais thermiques jusqu'à son réenclenchement il faut attendre 0,5 à 3 minutes. Ce temps est suffisant pour refroidir la bilame du relais thermique et partiellement l'enroulement du moteur.

La bobine du contacteur-disjoncteur est prévue pour fonctionner sous une tension de 85 à 100 % de la tension nominale. La tension minimale pour laquelle la bobine maintient le contacteur-disjoncteur fermé est de 50 à 60 % inférieure à la valeur nominale. Lorsque la tension du réseau baisse brusquement ou disparaît complètement la bobine du contacteur-disjoncteur ouvre automatiquement les contacts principaux en arrêtant ainsi le moteur.

Les coupe-circuit à fusibles montés séparément en amont du contacteur-disjoncteur protègent le réseau contre les courts-circuits dans le moteur.

Pour des moteurs à deux sens de rotation on utilise des contacteurs inverseurs du type ПМР. La figure 398 représente son schéma.

Un contacteur-disjoncteur inverseur se compose de deux contacteurs: un pour la marche du moteur « en avant »

et l'autre pour la marche « en arrière ». L'appareil comporte deux bobines: *BAv* — bobine d'enclenchement « en avant » et *BAr* — bobine d'enclenchement « en arrière ».

La boîte à boutons comporte trois boutons: « avant», « arrière » et « arrêt ».

Les deux contacteurs sont verrouillés mécaniquement et électriquement de façon que lorsque l'un d'eux est enclenché l'autre ne puisse pas être enclenché. Le verrouillage

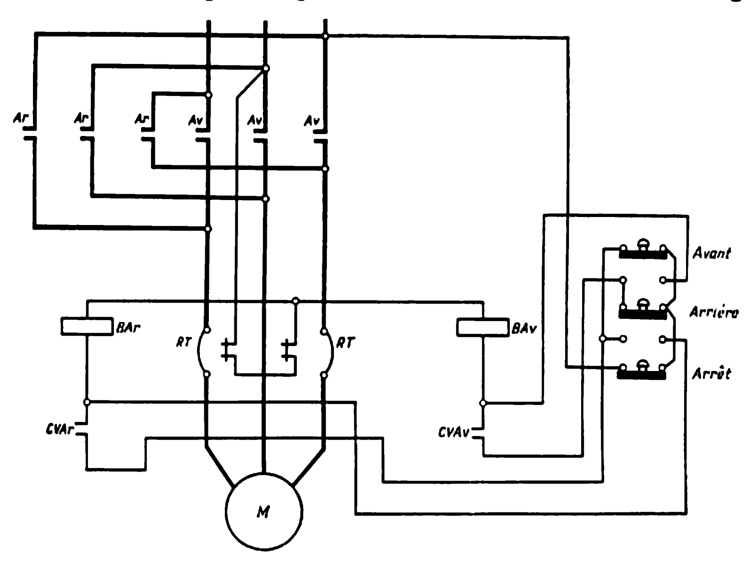


Fig. 398. Schéma d'un contacteur-disjoncteur inverseur

électrique est assuré par les contacts normalement fermés de la boîte à boutons par les boutons « avant » et « arrière ». Les relais thermiques *RT*, leurs contacts et les contacts de verrouillage ont la même destination que dans les contacteurs-disjoncteurs ordinaires.

Examinons le fonctionnement d'un contacteur-disjoncteur inverseur. Lorsqu'on appuie, par exemple, sur le bouton « avant », le courant d'une phase passe par le bouton « arrêt », ensuite par le bouton « arrière » qui enclenche la bobine « avant » (*BAv*), ensuite par les contacts des relais thermiques *RT* à l'autre phase. La bobine d'enclenchement *BAv* est excitée et ferme les contacts principaux « avant ». Au même moment est fermé le contact de verrouil-

lage CV, il shunte le bouton « avant » qui maintenant peut être lâché. Le moteur est mis sous tension et démarre. Il est à noter que lorsqu'on appuie sur le bouton « avant », le courant passe par le bouton « arrière » et inversement. Le verrouillage électrique est ainsi réalisé. Le changement du sens de rotation du moteur a lieu lors de la fermeture du contacteur « arrière » qui permute les deux phases extrêmes.

§ 199. MODES DE DÉMARRAGE DES MOTEURS ASYNCHRONES

Le démarrage des moteurs asynchrones peut être assuré soit sous pleine tension (démarrage direct) soit sous tension réduite.

Le démarrage direct est réalisé à l'aide des interrupteurs à couteaux, des commutateurs, des interrupteurs rotatifs,

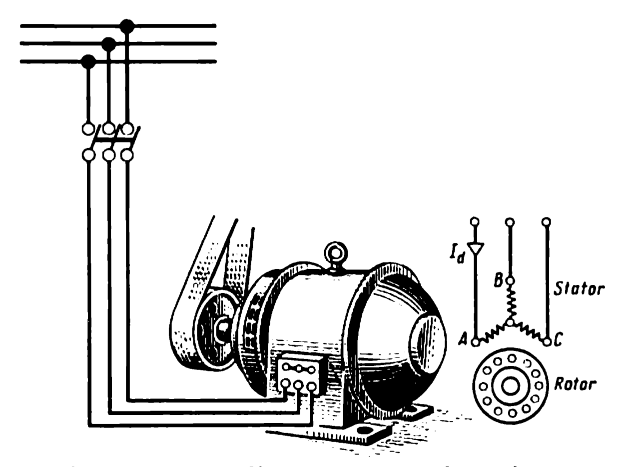


Fig. 399. Démarrage direct d'un moteur asynchrone à rotor en court-circuit

des contacteurs-disjoncteurs, des contacteurs et des combinateurs. Lors du démarrage direct la tension totale du réseau est appliquée au moteur. Ce mode de démarrage présente le défaut d'exiger de forts courants de démarrage de 2 à 7 fois supérieurs au courant nominal du moteur.

Le mode de démarrage le plus simple est le démarrage direct des moteurs asynchrones à rotor en court-circuit. La mise en marche et l'arrêt de ces moteurs se font par

la fermeture ou l'ouverture d'un interrupteur à couteaux (d'un contacteur-disjoncteur), etc. La figure 399 représente le schéma pour le démarrage direct d'un moteur asynchrone à rotor en court-circuit. La mise en marche des moteurs asynchrones à rotor bobiné se fait à l'aide d'un rhéostat de démarrage connecté à l'enroulement rotorique par

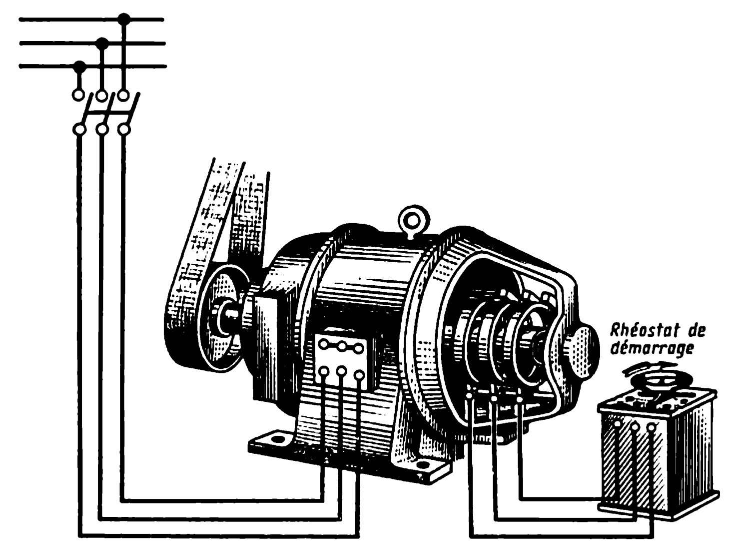


Fig. 400. Schéma de démarrage d'un moteur asynchrone à rotor bobiné

l'intermédiaire des bagues et des balais. Avant la mise en marche du moteur il faut s'assurer que les résistances du rhéostat sont entièrement en circuit. À la fin du démarrage, le rhéostat est progressivement mis hors circuit et est court-circuité ensuite. La présence d'une résistance ohmique dans le circuit rotorique lors du démarrage diminue le courant de démarrage en augmentant ainsi le couple de démarrage. La figure 400 montre le schéma de démarrage d'un moteur asynchrone à rotor bobiné.

Pour réduire le courant de démarrage on diminue parfois la tension appliquée aux enroulements statoriques du moteur.

Examinons deux modes de démarrage des moteurs asynchrones sous tension réduite : à l'aide d'un commutateur étoile-triangle et à l'aide d'un autotransformateur.

Démarrage étoile-triangle. La figure 401 montre le schéma de principe de branchement de l'enroulement statorique à l'aide d'un commutateur étoile-triangle. Lors du démarrage, l'enroulement statorique est couplé en étoile. Au moment où le moteur développe la vitesse maximale possible pour ce genre de connexion, le commutateur est placé à gauche de sorte que l'enroulement statorique

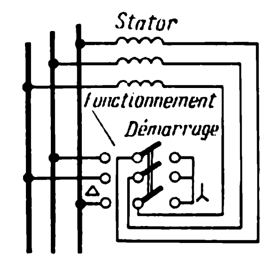


Fig. 401. Commutation de l'enroulement statorique « étoile-triangle » lors du démarrage du moteur

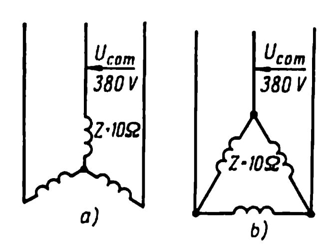


Fig. 402. Branchement de l'enroulement statorique du moteur :
a — en étoile ; *b* — en triangle

se trouve couplé en triangle et le moteur développe sa pleine vitesse. Ce mode de démarrage permet de diminuer le courant de démarrage de 3 fois. L'explication est donnée par l'exemple suivant.

La figure 402, *a* schématise l'enroulement statorique branché en étoile lors du démarrage. Supposons que la tension entre les fils de ligne du moteur soit égale à 380 V et, par conséquent, la tension par phase du moteur lors du démarrage sera :

$$U_{\text{ph Y}} = \frac{U_{\text{com Y}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ V}.$$

Puisque l'impédance de l'enroulement de phase du moteur est égale à 10 ohms, le courant de phase sera :

$$I_{\text{ph Y}} = \frac{U_{\text{ph Y}}}{z} = \frac{220}{10} = 22 \text{ A}.$$

En cas de couplage en étoile $I_{\text{com Y}} = I_{\text{ph Y}}$. Pour cette raison, le courant absorbé par le moteur à la fin du démarrage (sans tenir compte des courants de démarrage) sera aussi égale à 22 A.

La figure 402, *b* schématise le même moteur avec l'enroulement couplé en triangle et branché sur la tension composée de 380 V. Dans ce cas $U_{com\,\Delta} = U_{ph\,\Delta}$ et, pour cette raison, le courant dans une phase du moteur sera:

$$I_{ph\,\Delta} = \frac{U_{ph\,\Delta}}{z} = \frac{380}{10} = 38\ \text{A}.$$

Puisque pour le couplage en triangle :

$$I_{com\,\Delta} = I_{ph\,\Delta}\sqrt{3},$$

le moteur dans ce cas absorbera du réseau un courant composé :

$$I_{com\,\Delta} = 38 \cdot \sqrt{3} = 66\ \text{A}.$$

Cet exemple montre que le courant composé du moteur pour le couplage en étoile des enroulements statoriques est trois fois inférieur au courant composé du moteur dont l'enroulement statorique est monté en triangle.

La figure 403 montre le schéma de branchement d'un commutateur « étoile-triangle » dans le circuit statorique d'un moteur asynchrone.

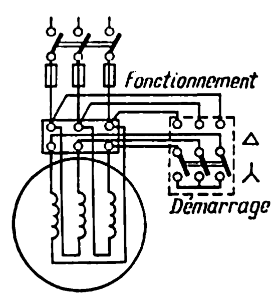


Fig. 403. Schéma de branchement du stator d'un moteur asynchrone à l'aide d'un commutateur « étoile-triangle »

Le mode de démarrage que nous venons d'examiner diminue le courant de démarrage de trois fois. Puisque le couple moteur est proportionnel au courant rotorique et, par conséquent, approximativement au courant statorique, le couple de démarrage du moteur diminue également de trois fois. Pour cette raison, on peut utiliser ce mode de démarrage seulement lorsque le moteur est lancé à vide ou à faible charge.

Il est évident qu'on ne peut utiliser la commutation étoile-triangle de l'enroulement statorique lors du démarrage que pour les moteurs qui normalement sont montés en triangle.

Démarrage par autotransformateur. On peut diminuer la tension appliquée au moteur et réduire ainsi son courant de démarrage également à l'aide d'un autotransformateur. La figure 404, *a* montre le schéma de démarrage d'un moteur

asynchrone de basse tension M à l'aide d'un autotransformateur AT. La figure 404, b représente le schéma de démarrage d'un moteur de haute tension. Dans ce dernier cas, l'autotransformateur AT a un point neutre qui peut être débranché. Pour la mise en marche du moteur M on enclenche le disjoncteur à huile *1* en branchant ainsi le point neutre

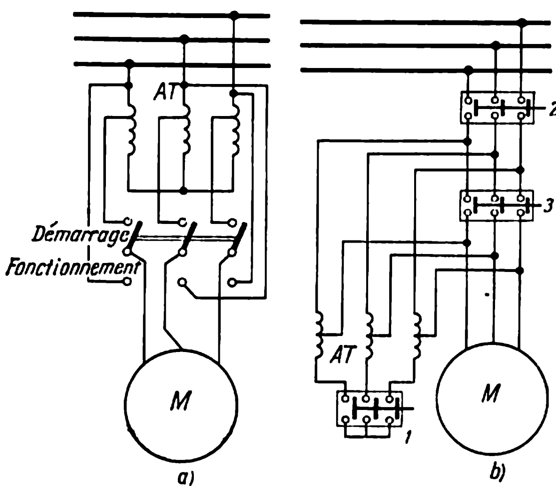


Fig. 404. Démarrage d'un moteur à l'aide d'un autotransformateur: *a* — moteur basse tension; *b* — moteur haute tension

de l'autotransformateur. Ensuite on enclenche le disjoncteur principal dans l'huile *2*; le moteur est alimenté par l'intermédiaire de l'autotransformateur sous une tension réduite et il démarre. Lorsque le moteur tourne à la vitesse maximale possible (pour le type de couplage donné), le disjoncteur *1* s'ouvre et le disjoncteur *3* se ferme. Le moteur est alors alimenté sous la tension totale du réseau et tourne à vitesse normale.

Lors du démarrage, les autotransformateurs abaissent la tension de 50 à 80 %.

§ 200. MODES DE DÉMARRAGE DES MOTEURS SYNCHRONES

Le démarrage complexe des moteurs synchrones est l'un de leurs défauts principaux. La mise en marche d'un moteur synchrone peut être réalisée à l'aide d'un moteur de démarrage auxiliaire ou par démarrage en asynchrone.

Démarrage d'un moteur synchrone à l'aide d'un moteur auxiliaire. Si l'on fait tourner le rotor d'un moteur synchrone à pôles excités à l'aide d'un moteur auxiliaire de façon à atteindre la vitesse de rotation du champ statorique, les pôles magnétiques du stator en interaction avec les pôles

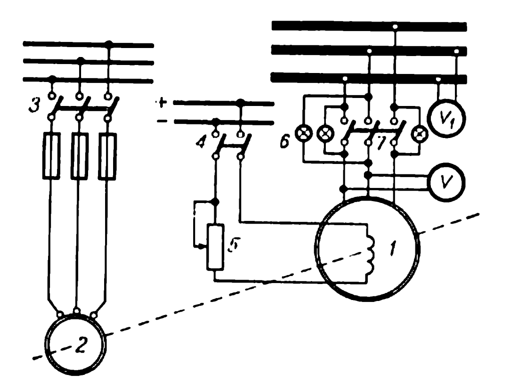


Fig. 405. Schéma de démarrage d'un moteur synchrone à l'aide d'un moteur de démarrage

du rotor obligeront ce dernier à tourner de façon autonome, sans aide extérieure, en synchronisme avec le champ statorique.

La figure 405 représente le schéma de démarrage d'un moteur synchrone *1* à l'aide d'un moteur asynchrone auxiliaire *2*.

Pour réaliser le démarrage il faut que le nombre de paires de pôles du moteur asynchrone soit inférieur au nombre de paires de pôles du moteur synchrone, car seulement dans ces conditions le moteur asynchrone auxiliaire peut faire tourner le rotor du moteur synchrone à la vitesse de synchronisme.

Le démarrage du moteur synchrone est réalisé dans l'ordre suivant. En fermant l'interrupteur *3* on lance le moteur asynchrone auxiliaire *2* qui fait tourner le rotor du moteur synchrone *1* à une vitesse qui correspond à la vitesse du champ statorique. La vitesse de rotation du moteur auxiliaire est déterminée d'après un tachymètre [1]). Ensuite, en fer-

[1]) Le tachymètre est un appareil qui mesure la vitesse de rotation d'une machine.

mant l'interrupteur *4* du circuit à courant continu, on excite les pôles du rotor. Pour brancher le moteur synchrone sur le réseau triphasé il faut le mettre en synchronisme comme on met en synchronisme un alternateur synchrone pour la marche en parallèle. A cette fin, à l'aide du rhéostat *5* on règle l'excitation de façon que la tension de l'enroulement statorique mesurée au voltmètre V soit égale à la tension du réseau mesurée au voltmètre V_1. Les lampes *6* branchées parallèlement aux couteaux de l'interrupteur *7* du réseau triphasé commencent à clignoter lorsque cet interrupteur est ouvert. D'abord le clignotement est fréquent, mais lorsqu'on fait varier la vitesse du moteur asynchrone auxiliaire les lampes clignoteront de plus en plus rarement. On peut brancher le moteur synchrone sur le réseau triphasé à l'aide de l'interrupteur *7* lorsque toutes les trois lampes s'éteignent simultanément. Le rotor du moteur se met alors en synchronisme et peut ensuite tourner de façon autonome. A ce moment on peut débrancher le moteur auxiliaire *2* du réseau à l'aide de l'interrupteur *3*.

La complexité du démarrage et la nécessité d'avoir un moteur auxiliaire sont les défauts importants de ce mode de démarrage des moteurs synchrones. Pour cette raison il est employé rarement.

Démarrage en asynchrone d'un moteur synchrone. Pour réaliser ce mode de démarrage, on place dans les pièces polaires du rotor un enroulement complémentaire court-circuité. A cause de la grande F.É.M. induite pendant le démarrage dans l'enroulement d'excitation *1* du moteur, pour des raisons de sécurité, cet enroulement est fermé par l'interrupteur *2* sur une résistance *3* (fig. 406).

Lorsque l'enroulement statorique *4* du moteur synchrone est branché sur le réseau triphasé, un champ tournant apparaît qui, en coupant l'enroulement court-circuité (de démarrage) placé dans les pièces polaires du rotor, induit des courants dans celui-ci.

Ces courants, en interaction avec le champ tournant du stator, font tourner le rotor. Lorsque le rotor atteint sa vitesse maximale (95 à 97 % de la vitesse de synchronisme), on manœuvre le commutateur *2* de façon à brancher l'enroulement rotorique sur le réseau à courant continu.

Le démarrage en asynchrone présente le défaut d'exiger un fort courant de démarrage (5 à 7 fois supérieur au courant nominal). Le courant de démarrage provoque une chute

de tension dans le réseau, ce qui influe sur le fonctionnement des autres récepteurs. Afin de réduire le courant de démarrage on utilise le démarrage à tension réduite à l'aide d'une bobine de réactance ou d'un autotransformateur.

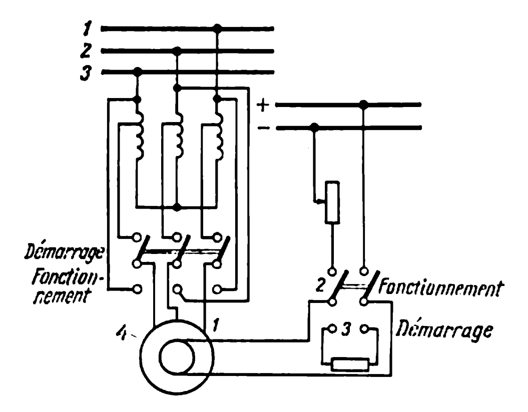


Fig. 406. Schéma de démarrage en asynchrone d'un moteur synchrone à l'aide d'un autotransformateur

A l'heure actuelle, on utilise presque exclusivement le démarrage en asynchrone des moteurs synchrones en raisoe de sa simplicité et sécurité. Il existe également des schémas de démarrage en asynchrone automatique des moteurs synchrones.

§ 201. INVERSION DU SENS DE ROTATION DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

On peut changer le sens de rotation des moteurs à courant continu en inversant le sens du courant dans l'enroulement d'induit lorsque le sens du courant dans l'enroulement d'excitation reste inchangé. On peut également le faire en inversant le sens du courant dans l'enroulement d'excitation, si le sens du courant dans l'enroulement d'induit reste inchangé. Mais si l'on change simultanément le sens du courant dans l'enroulement d'induit et dans l'enroulement d'excitation, le sens de rotation du moteur reste le même.

Ainsi, on change le sens de rotation d'un moteur à courant continu à excitation en série en inversant le sens du courant dans l'enroulement d'induit ou dans l'enroulement d'excitation.

On change le sens de rotation des moteurs à excitation en dérivation et à excitation composée en inversant le sens du courant dans l'enroulement d'induit. La coupure des

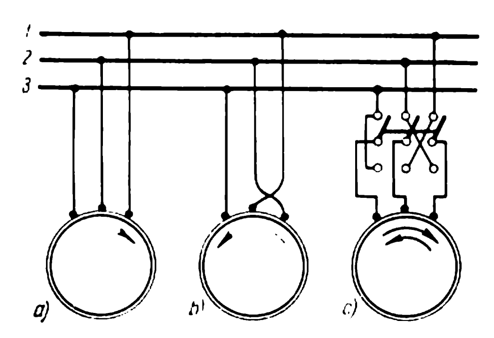


Fig. 407. Changement du sens de rotation d'un moteur asynchrone: *a*, *b* — en intervertissant les fils, *c* — à l'aide d'un commutateur

circuits des enroulements dérivation pour faire changer le sens du courant peut provoquer le percement de leur isolation à cause de l'apparition d'une grande F.É.M. d'auto-induction.

Le sens de rotation du rotor d'un moteur asynchrone dépend du sens de rotation du champ magnétique statorique.

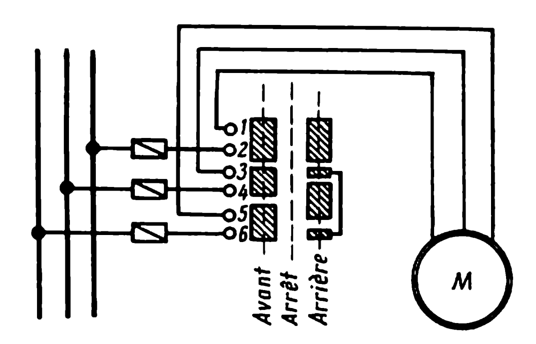


Fig. 408. Changement du sens de rotation d'un moteur à l'aide d'un combinateur

Pour changer le sens de rotation du champ statorique il faut intervertir deux fils quelconques aboutissant à l'enroulement statorique du moteur.

La figure 407, *a*, *b* schématise le cas de changement de rotation d'un moteur asynchrone. En intervertissant les fils connectés à deux phases quelconques du stator, on change le sens de rotation du moteur. A cette fin, on monte un commutateur (fig. 407, *c*).

Pour la commande à distance d'un moteur et lorsqu'il est nécessaire de changer son sens de rotation on installe un contacteur-disjoncteur inverseur.

Dans les moteurs de grande puissance le changement du sens de rotation est réalisé à l'aide d'un appareil spécial appelé combinateur (fig. 408). Les segments de cuivre montés sur le tambour du combinateur lors de la rotation de ce dernier sont réunis par des contacts fixes *1-6* et assurent le branchement, le débranchement et la commutation nécessaires.

§ 202. RÉGLAGE DE LA VITESSE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

On peut régler la vitesse de rotation des moteurs à courant continu en faisant varier la tension appliquée au moteur ou en faisant varier son flux magnétique.

La formule

$$n \approx \frac{U}{c\Phi}$$

montre que la vitesse des moteurs à courant continu est proportionnelle à la tension U et inversement proportionnelle à la valeur du flux magnétique Φ.

On peut faire varier la tension appliquée à l'induit du moteur en insérant en série avec l'induit une résistance variable de réglage ou en connectant en série et en parallèle des enroulements d'induit de plusieurs moteurs. Cette dernière méthode est utilisée pour le réglage de la vitesse des tramways et des locomotives électriques.

Le plus souvent pour régler la vitesse des moteurs, on fait varier leur flux magnétique. A cette fin, on insère dans le circuit de l'enroulement d'excitation du moteur un rhéostat permettant un réglage progressif et dans de larges limites.

Le réglage de la vitesse des moteurs asynchrones se fait par l'une des méthodes suivantes.

1. Changement du nombre de pôles du moteur. Pour pouvoir changer le nombre de paires de pôles d'un moteur on

fait son stator soit avec deux enroulements indépendants, soit avec un enroulement que l'on peut commuter pour différents nombres de pôles.

La figure 409, *a* schématise deux bobines d'une phase couplées en série. Le dessin montre que les bobines créent quatre pôles magnétiques.

Les mêmes bobines couplées en parallèle créent seulement deux pôles (fig. 409, *b*). La commutation des enroulements

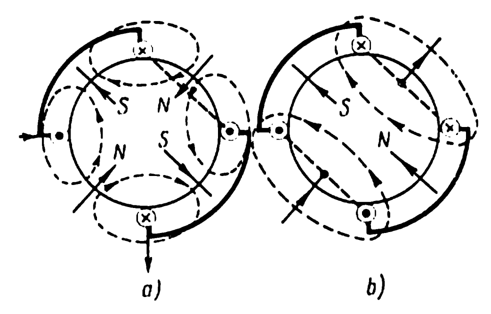


Fig. 409. Changement du nombre de paires de pôles dans le stator d'un moteur

statoriques se fait à l'aide d'un combinateur. Par cette méthode, la vitesse du moteur est réglée par bonds.

On trouve des moteurs dont les vitesses de synchronisme peuvent être de 3000, 1500, 1000 et 750 tr/mn.

Le réglage de la vitesse d'un moteur par commutation du nombre de pôles peut être assuré seulement pour les moteurs asynchrones à rotor en court-circuit. Un moteur à rotor en court-circuit peut fonctionner avec un nombre quelconque de pôles du stator. Par contre, le rotor d'un moteur à bagues ne peut fonctionner normalement qu'avec un nombre déterminé de pôles du stator, car autrement il faudrait commuter également l'enroulement rotorique, ce qui est compliqué.

2. Variation de la fréquence du courant alternatif. Cette méthode permet de faire varier la fréquence du courant alternatif alimentant l'enroulement du stator à l'aide d'un générateur spécial (convertisseur de fréquence). Il est avantageux de régler la vitesse par variation de la fréquence lorsqu'on a un grand nombre de moteurs dont on doit simultanément faire varier d'une façon progressive la vitesse (table à rouleau, machines textiles, etc.).

3. Introduction d'une résistance dans le circuit rotorique. Les deux premières méthodes de réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone exigent soit un moteur spécial, soit un convertisseur de fréquence et, pour cette raison, ne sont pas largement utilisées.

La troisième méthode de réglage de la vitesse des moteurs asynchrones consiste en ce que pendant le fonctionnement du moteur on insère dans le circuit de l'enroulement rotorique la résistance du rhéostat de réglage. Il est évident que cette méthode de réglage peut être appliquée seulement aux moteurs asynchrones à rotor bobiné.

Considérons les processus physiques ayant lieu dans le moteur lorsqu'on introduit une résistance dans son circuit rotorique.

Le champ tournant du stator induit dans l'enroulement rotorique une F.É.M. E_{2g}. Ainsi, lors du démarrage, la F.É.M. du rotor peut être tellement grande que le contact avec le circuit rotorique (le rhéostat) devient dangereux.

Examinons le cas où pour un certain glissement dans l'enroulement rotorique est induite une F.É.M. E_{2g} qui crée dans le circuit rotorique un courant I_2. Ce courant, en interaction avec le champ statorique Φ_1, crée un couple moteur égal au couple résistant. Introduisons maintenant dans le circuit rotorique la résistance du rhéostat. Au premier instant, le rotor tourne avec la même vitesse, la F.É.M. du rotor E_{2g} crée un courant plus faible I_2 à cause de la résistance augmentée du circuit. Avec un courant plus faible I_2, le couple moteur devient inférieur au couple résistant appliqué à l'arbre du moteur et la vitesse du rotor commence à diminuer jusqu'au moment où la nouvelle F.É.M. E_{2g} augmentée du rotor crée un courant égal au courant initial I_2, lequel en interaction avec le champ statorique rétablit le couple moteur initial. Toute augmentation de la résistance du circuit rotorique est donc accompagnée d'un accroissement du glissement ou d'une diminution de la vitesse de rotation du moteur.

Le rhéostat de réglage est branché dans le circuit rotorique de la même façon que le rhéostat de démarrage. La différence entre les deux rhéostats consiste en ce que celui de réglage est prévu pour supporter un courant prolongé. Pour les moteurs dont le réglage de la vitesse se fait par variation de la résistance du circuit rotorique, les deux rhéostats sont réunis et forment un seul rhéostat de démarrage et de réglage.

Cette méthode de réglage présente le défaut suivant. Dans le rhéostat de réglage a lieu une perte de puissance qui est d'autant plus grande que les limites de réglage de la

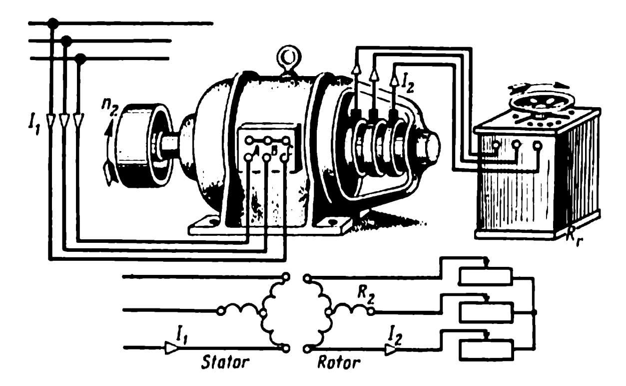


Fig. 410. Schéma de branchement d'un moteur asynchrone à l'aide d'un rhéostat de démarrage et de réglage

vitesse sont plus larges. La figure 410 montre le schéma de branchement d'un moteur asynchrone avec un rhéostat de démarrage et de réglage.

4. Réglage de la vitesse à l'aide d'inductances variables par saturation. Ces dernières années, on utilise pour le réglage de la vitesse des moteurs asynchrones des inductances

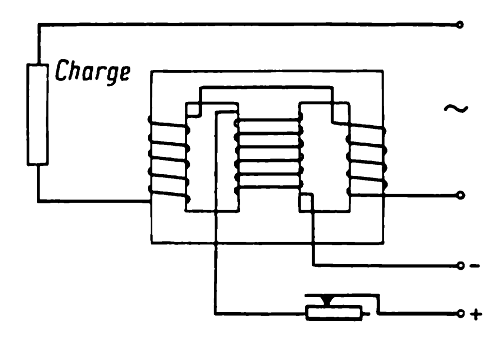


Fig. 411. Schéma d'une bobine de saturation

variables par saturation. La figure 411 montre le schéma d'une inductance monophasée. Elle comporte deux enroulements dont l'un est branché dans le circuit à courant alter-

natif, tandis que l'autre, appelé enroulement de commande ou d'excitation, est branché sur une source de tension continue (redresseur). Avec l'accroissement du courant dans la bobine de commande, le circuit magnétique de la bobine devient saturé et la réactance d'induction de l'enroulement en courant alternatif diminue. En insérant les bobines dans chaque phase d'un moteur asynchrone et en faisant varier le courant dans l'enroulement de commande on peut faire varier la réactance du circuit statorique du moteur et, par conséquent, la vitesse de rotation de ce dernier.

En plus des méthodes indiquées, il y a d'autres méthodes de réglage de la vitesse des moteurs asynchrones. Par exemple, le réglage par accouplement mécanique de deux moteurs asynchrones dont l'un fonctionne en moteur et l'autre en régime de freinage par contre-courant; le réglage d'après un montage à stator pivotant; le réglage de la vitesse à l'aide d'un manchon de glissement asynchrone; la connexion des moteurs en cascade, etc.

§ 203. SCHÉMAS SPÉCIAUX DE DÉMARRAGE ET DE RÉGLAGE DE LA VITESSE DES MOTEURS À COURANT CONTINU DE GRANDE PUISSANCE

Pour mettre en marche des moteurs à courant continu de grande puissance ainsi que pour régler leur vitesse dans de larges limites on utilise le système générateur-moteur dit Ward-Léonard (pour la commande des machines d'extraction, des laminoirs, des machines à papier, etc.). Le démarrage et le réglage de la vitesse du moteur suivant ce schéma (fig. 412) sont réalisés de façon suivante. Le moteur *1* est alimenté par une dynamo *2* actionnée par un moteur synchrone ou asynchrone *3*. L'excitation du moteur et de la dynamo est assurée par une excitatrice spéciale *4* calée sur le même arbre que la dynamo. Pour mettre en marche le moteur à courant continu il faut lancer d'abord le moteur primaire de la dynamo. Lorsque cette dernière tourne à sa vitesse normale on diminue la résistance du rhéostat *5* dans le circuit d'excitation de la dynamo. La tension de cette dernière augmente progressivement jusqu'à la valeur nominale. La tension aux balais de l'induit du moteur à courant continu augmente et il démarre. En faisant varier la résistance du rhéostat de réglage dans le circuit d'excitation de la dy-

namo on peut modifier la vitesse de rotation du moteur à courant continu.

Ce système permet de réaliser le démarrage progressif et le réglage de la vitesse de rotation du moteur (100 : 1). Au cas où par suite des conditions de travail le moteur

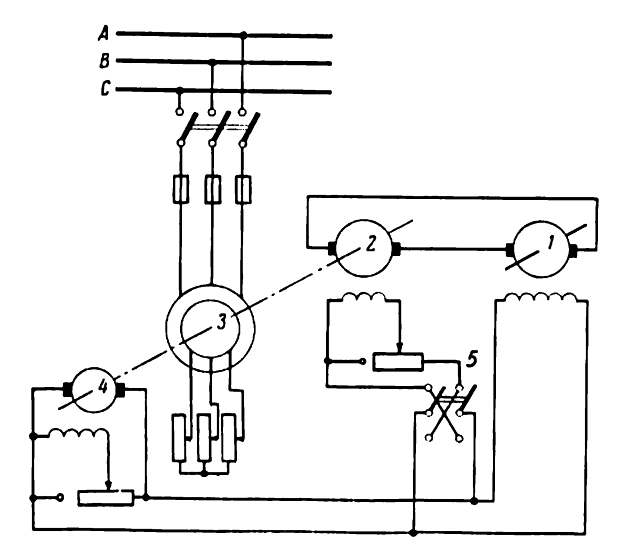


Fig. 412. Schéma d'un groupe génératrice-moteur

à courant continu doit changer son sens de rotation, on installe dans le circuit d'excitation de la dynamo un commutateur. En inversant le sens du courant dans l'enroulement d'excitation on change la polarité aux balais et le moteur à courant continu change son sens de rotation.

Lorsque la charge sur l'arbre du moteur subit de brusques variations (machines d'extraction de mines, laminoirs), le démarrage du moteur est réalisé d'après le schéma générateur-moteur avec volant. La différence entre ce schéma et le schéma précédent consiste en l'existence d'un lourd volant sur l'arbre réunissant le moteur primaire à la dynamo. Pour la marche avec volant on choisit un moteur primaire ayant une caractéristique mécanique tombante, c'est-à-dire que lorsque la charge sur l'arbre croît, la vitesse du moteur diminue. L'accroissement de la charge sur l'arbre du moteur à courant continu provoque une augmentation du

courant absorbé par le moteur. La puissance nécessaire pour entraîner la dynamo en charge augmente. En l'absence de volant, le moteur primaire prend toute la puissance complémentaire au réseau en provoquant ainsi de brusques variations de courant. Les variations de courant du réseau sont plus faibles lorsque le moteur primaire a un volant sur son arbre. Le lourd volant en rotation possède une réserve d'énergie cinétique. Lorsque la charge de la dynamo augmente, la vitesse du moteur primaire diminue et l'énergie cinétique libérée du volant permet de compenser les fortes et brusques variations de la charge mécanique sur l'arbre du moteur à courant continu *1*.

Lorsque la charge diminue, le moteur primaire augmente sa vitesse et le volant accumule de l'énergie cinétique.

§ 204. FREINAGE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

Lorsqu'on supprime la charge d'un moteur électrique et on le débranche du réseau il continue à tourner par inertie pendant un certain temps. La durée de sa rotation par inertie jusqu'à l'arrêt sera particulièrement grande lorsque le moteur possède une grande masse et une vitesse élevée. Mais pendant le fonctionnement du moteur des démarrages et des arrêts fréquents sont possibles (machines-outils, ponts roulants, monte-charges, etc.). Il est à noter que l'arrêt rapide d'un moteur est plus important que son démarrage rapide. Si un retard lors du démarrage d'un moteur cause le chômage de l'équipement, tout retard lors du freinage peut provoquer l'endommagement des mécanismes, des avaries et même des accidents mortels.

Le freinage des moteurs peut être mécanique ou électrique.

Le freinage mécanique. Il se fait à l'aide d'un frein à ruban ou à sabots. La figure 413 montre le schéma de principe d'un frein à ruban avec déblocage électromagnétique. La poulie du moteur *1* est entourée d'un ruban d'acier *2* avec des sabots en bois. Le levier de freinage *4* comportant à son extrémité une masse *5* pivote sur l'appui *3*. Les bouts du ruban sont fixés aux ergots *6* du levier. Lorsque la bobine *7* est débranchée, le levier de freinage sous l'effet de la masse occupe la position inférieure extrême. Les ergots du levier tendent le ruban d'acier qui par les sabots serre la poulie du moteur.

Pour faire démarrer le moteur, on branche sur le réseau la bobine 7 qui attire le noyau d'acier réuni par articulation avec le levier de freinage. Le levier se soulève, le ruban devient lâche et la poulie du moteur est débloquée.

Le freinage mécanique est souvent employé sur les ponts roulants. Avec ce mode de freinage, l'énergie cinétique du moteur se transforme en énergie thermique qui est perdue dans les sabots ou dans le ruban de freinage.

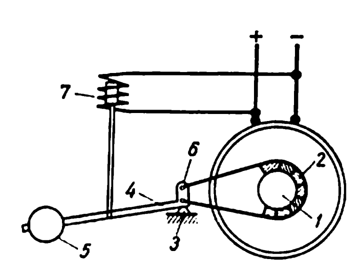


Fig. 413. Freinage mécanique d'un moteur avec déblocage électromagnétique du frein

Le freinage électrique. Il peut être assuré par des méthodes suivantes: 1) fermeture de l'induit du moteur débranché du réseau sur une résistance (freinage dynamique), 2) récupération de l'énergie dans le réseau, 3) commutation du moteur pour rotation en sens inverse (freinage par contre-courant). Lors du freinage électrique l'énergie cinétique du moteur est transformée en énergie électrique.

Le freinage du moteur par fermeture de l'induit sur une résistance est réalisé de façon suivante. Pour le freinage du moteur on débranche du réseau l'enroulement d'induit et on le ferme sur la résistance de freinage, tandis que l'enroulement d'excitation du moteur reste connecté au réseau. Le courant dans l'enroulement d'induit pendant le fonctionnement du moteur est

$$I_{\text{ind}} = \frac{U-E}{r_{\text{ind}}},$$

Fig. 414. Tension du réseau, force contre-électromotrice et courant d'un moteur électrique lors de son fonctionnement

et le sens du courant d'induit coïncide avec le sens de la tension du réseau (fig. 414).

Lorsque l'induit est débranché du réseau et son enroulement est fermé sur une résistance, le courant circulant dans l'induit est

$$-I = \frac{-E}{r_{\text{ind}}+r}.$$

La force contre-électromotrice E induite dans l'enroulement d'induit lors de la rotation du moteur a un sens opposé à celui de la tension du réseau. Pour cette raison le courant dû à cette force contre-électromotrice circule dans un sens opposé à celui du courant pendant le fonctionnement du moteur. Par suite du changement du sens de courant dans l'enroulement d'induit, le sens de courant dans l'enroulement d'excitation restant le même, le moteur, tout en tournant dans le sens précédent, développe un couple moteur

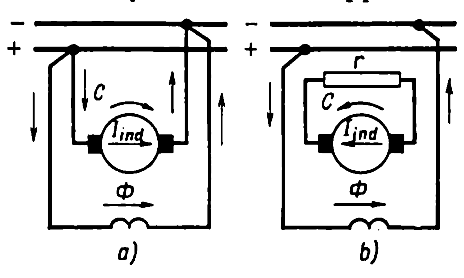


Fig. 415. Freinage d'un moteur par branchement de son induit sur une résistance:

a — schéma du moteur avant le freinage; *b* — schéma du moteur à l'instant du freinage

dirigé en sens inverse, c'est-à-dire qu'il est freiné. Au fur et à mesure que le moteur ralentit, la force contre-électromotrice diminue et le couple de freinage diminue également. Le freinage du moteur est d'autant plus rapide que la résistance de freinage est plus faible. Si au moment du freinage on débranche du réseau simultanément avec l'induit l'enroulement d'excitation, le flux magnétique du moteur diminue avec la force contre-électromotrice et le freinage rapide n'a pas lieu. Lors du freinage d'un moteur à excitation en dérivation il ne faut pas commuter l'enroulement d'excitation (fig. 415). Examinons le freinage d'un moteur à excitation en série par fermeture de son induit sur une résistance. Si on débranche les bouts des fils du moteur et on les ferme par une résistance de freinage, le sens de courant change simultanément dans l'enroulement d'induit et dans l'enroulement d'excitation et le moteur n'est pas freiné. Afin d'éviter cela, à l'instant du freinage on commute l'enroulement d'excitation du moteur de façon que le sens de courant y reste le même. Pour les moteurs à excitation composée (compound), le freinage électrique par la fermeture de l'in-

duit sur une résistance est réalisé de la même façon que dans les moteurs à excitation en dérivation.

Le freinage électrique avec récupération de l'énergie dans le réseau est possible lorsque la force contre-électromotrice du moteur devient supérieure à la tension du réseau. Cela peut arriver dans les cas suivants: 1) la tension du réseau devient inférieure à sa valeur normale; 2) le moteur est surexcité; 3) la vitesse du moteur devient supérieure à la vitesse à vide. Dans tous ces cas, le sens de courant dans l'enroulement d'induit s'inverse et le moteur, tout en tournant dans le même sens grâce à l'énergie cinétique, se transforme en génératrice et fournit de l'énergie au réseau. L'induit du moteur développe alors un couple résistant grâce auquel sa vitesse de rotation diminue jusqu'au moment où la force contre-électromotrice devient égale à la tension du réseau. Un pareil accroissement de vitesse, déterminé à l'instant donné par la tension et le flux magnétique, peut avoir lieu, par exemple, pour un moteur d'un pont roulant sous l'effet du poids de la charge qu'il descend ou pour un moteur d'une locomotive électrique (d'un tramway) descendant une pente.

Dans un moteur à excitation en dérivation, le freinage par récupération d'énergie a lieu automatiquement sans aucune commutation des enroulements. Dans un moteur à excitation en série, le freinage par cette méthode ne peut pas avoir lieu sans commutation des enroulements, car le sens de courant change simultanément dans l'enroulement d'induit et dans l'enroulement d'excitation.

Les moteurs à excitation composée peuvent être freinés par accroissement de la vitesse par rapport à la vitesse à vide seulement lorsque l'influence de l'enroulement d'excitation en dérivation est dominante.

Le freinage par contre-courant consiste en ce que l'enroulement d'induit du moteur en marche est commuté et le sens de courant dans cet enroulement change. Dans ce cas le courant dans l'enroulement d'induit est

$$I_{\text{ind}} = \frac{-U + E}{r_{\text{ind}}},$$

c'est-à-dire qu'il est proportionnel à la somme de U et de E et non pas à leur différence. Pour cette raison, au premier instant, la valeur du courant dans l'enroulement d'induit est particulièrement grande (20 à 40 fois supérieure à la valeur nominale), le moteur reçoit un fort choc mécanique

et la chaleur dégagée par l'enroulement à ce moment est dangereuse pour l'enroulement et son isolation. Après la commutation de l'enroulement d'induit pour la marche inverse, le moteur, tout en continuant à tourner dans le sens précédent, développe un fort couple de freinage.

Cette méthode de freinage exige le débranchement à temps du moteur du réseau, car autrement, après l'arrêt, il se mettra à tourner en sens inverse. Le freinage par contre-courant de la façon que nous venons de décrire n'est utilisé que dans des cas exceptionnels vu les suites dangereuses de ce freinage pour le moteur. Mais, si à l'instant de commutation on introduit dans le circuit de l'enroulement d'induit la résistance du rhéostat de démarrage, le choc causé par le courant ne sera pas excessivement grand.

Les moteurs asynchrones peuvent fonctionner en régimes de freinage suivants: marche en générateur, freinage par contre-courant et freinage dynamique.

Le freinage des moteurs asynchrones en régime générateur est possible lorsque leur vitesse est supérieure à celle de synchronisme. Dans ce cas, la machine fonctionnant en générateur est freinée et transmet de l'énergie au réseau.

Le freinage par contre-courant se fait par commutation en marche de deux phases du moteur. Le moteur, tout en continuant à tourner par inertie, développe un couple moteur dirigé en sens inverse. Lorsque le moteur s'arrête, il faut le débrancher du réseau, car autrement il commencera à tourner en sens inverse.

Le freinage dynamique d'un moteur asynchrone est réalisé par branchement de son enroulement statorique sur une tension continue.

§ 205. SCHÉMAS DE COMMANDE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES À L'AIDE D'APPAREILS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

1. Commande d'un moteur asynchrone à rotor en court-circuit (fig. 416). Dans ce schéma on utilise deux contacteurs L et T, deux relais thermiques $1RT$ et $2RT$, ainsi qu'un relais de contrôle de vitesse RCV. Le circuit d'alimentation de l'enroulement statorique du moteur est appelé circuit de puissance. La fermeture et l'ouverture du circuit de puissance se font par les contacts de ligne T et L des contacteurs correspondants. La commande des bobines des contacteurs

se fait par le circuit de commande. Le relais *RCV* est réuni à l'arbre du moteur et, pour une vitesse déterminée du moteur, ses contacts normalement ouverts se ferment.

Lorsqu'on appuie sur le bouton « marche », la bobine du contacteur *L* est excitée et il ferme les contacts *L* dans le circuit de puissance du moteur. Le contact auxiliaire *L* shunte le bouton « marche » et on peut lâcher ce bouton. En même

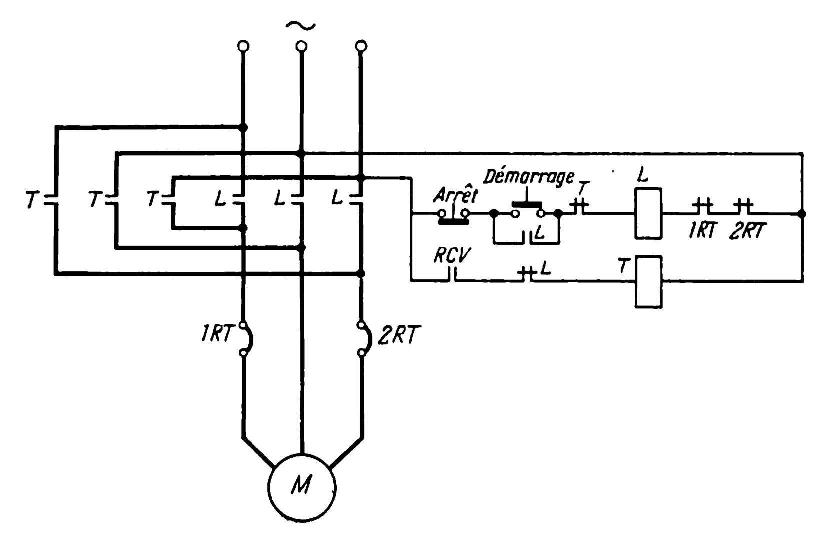


Fig. 416. Schéma de commande d'un moteur asynchrone à rotor en court-circuit

emps un autre contact *L* (fermé au repos) ouvre le circuit de la bobine du contacteur *T* qui ne peut pas se fermer malgré la fermeture du contact du relais *RCV*.

Lorsqu'on appuie sur le bouton « arrêt », le circuit du contacteur *L* est coupé, les contacts *L* dans le circuit de puissance s'ouvrent et le moteur est débranché du réseau. Le contact *L* se ferme, ce qui provoque l'excitation de la bobine du contacteur *T* qui ferme ses contacts dans le circuit de puissance. Comme le montre le schéma, deux phases sont alors interverties et le moteur, tout en tournant dans le même sens, développe un couple dirigé dans le sens opposé à celui de rotation. Le freinage par contre-courant a lieu. A peine la vitesse du moteur devient-elle égale à 10 ou 15 % de la valeur nominale que les contacts

du relais *RCV* s'ouvrent et le moteur est débranché du réseau. Le débranchement du moteur peut avoir lieu automatiquement. En cas de surcharge, les relais thermiques ouvrent leurs contacts dans le circuit du contacteur *L* et le moteur est débranché automatiquement du réseau.

2. Schéma de commande d'un moteur asynchrone à rotor bobiné (fig. 417). Ce schéma comporte quatre contacteurs: un contacteur de ligne *L* et trois contacteurs d'accélération

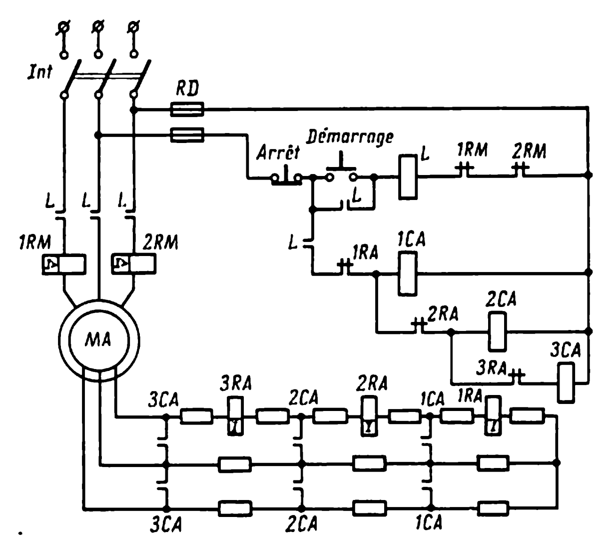


Fig. 417. Schéma de commande d'un moteur asynchrone à rotor bobiné

1CA, *2CA* et *3CA*. Dans le circuit rotorique sont branchées les résistances de démarrage *RD*. Dans le même circuit sont connectées les bobines des relais d'accélération de courant *1RA*, *2RA* et *3RA*. Ces relais sont réglés de façon que le courant d'enclenchement du relais *1RA* soit supérieur au courant d'enclenchement des relais *2RA* et *3RA* et le courant de déclenchement du relais *2RA* soit supérieur à celui du relais *3RA*.

Lorsqu'on appuie sur le bouton « marche », on enclenche le contacteur de ligne qui ferme par ses contacts le circuit d'alimentation de l'enroulement statorique du moteur. En même temps, le contact auxiliaire du contacteur *L* shunte le bouton « marche » que l'on peut lâcher maintenant. Par

suite des grands courants dans les résistances de démarrage lors du lancement du moteur, les bobines des trois relais d'accélération sont excitées et ces relais ouvrent leurs contacts dans les circuits des contacteurs d'accélération *1CA*, *2CA* et *3CA*.

Aussitôt que le courant dans le circuit rotorique diminue jusqu'à la valeur du courant de déclenchement du relais *1RA*, ce dernier fonctionne et ferme par son contact le circuit du contacteur *1CA* qui ferme ses contacts *1CA* dans le circuit rotorique si bien que le premier échelon des résistances est court-circuité. Au fur et à mesure que le courant dans le circuit rotorique diminue, le relais *2RA* et ensuite le relais *3RA* cessent de fonctionner. Dans le circuit de commande est excité le contacteur *2CA* qui court-circuite le deuxième échelon de la résistance dans le circuit rotorique et ensuite le contacteur *3CA* qui court-circuite le dernier échelon de la résistance de démarrage. Deux relais à maximum de courant *1RM* et *2RM* débranchent le moteur du réseau en cas de court-circuit dans le moteur et en cas de surcharge.

3. Schéma de commande d'un moteur à courant continu à excitation en dérivation (fig. 418). Le schéma prévoit le démarrage, l'arrêt et le changement du sens de marche du moteur.

La commande du moteur se fait à l'aide d'un combinateur auxiliaire pouvant prendre trois positions: position zéro — *CC0*, position avant — *CC1* et position arrière — *CC2*. Les contacts *CC0* sont normalement fermés. Le circuit de puissance comprend l'enroulement du relais à maximum de courant *RM*, l'enroulement d'induit du moteur et la résistance de démarrage. Le circuit de puissance est mis sous tension à l'aide de l'interrupteur à couteaux *1 Int*. Le circuit auxiliaire est alimenté par l'interrupteur à couteaux *2 Int*. Dans ce circuit sont branchés: l'enroulement d'excitation en dérivation *EE* du moteur, la résistance de réglage *RR* et la bobine du relais de disparition du champ *RDC*. Pour protéger l'enroulement d'excitation contre les surtensions lors du débranchement, cet enroulement est connecté à une résistance de décharge *RD*. Pour mettre le moteur en marche on ferme les interrupteurs *1 Int* et *2 Int*. L'enroulement d'excitation *EE* du moteur est alors alimenté et le relais *RDC* est excité. Ce dernier ferme son contact dans le circuit du relais *RT*. Ce relais est excité et ferme son contact normalement ouvert. Le pôle « + » du réseau arrive à l'enroulement

du relais *RT* par le contact normalement ouvert du relais *RT* et par le contact normalement fermé du combinateur auxiliaire *CCO*.

Après cela, le relais *1RA* ouvre son contact normalement fermé dans le circuit des contacteurs *1CA* et *2CA*. Lorsqu'on met la manette du combinateur auxiliaire dans la position

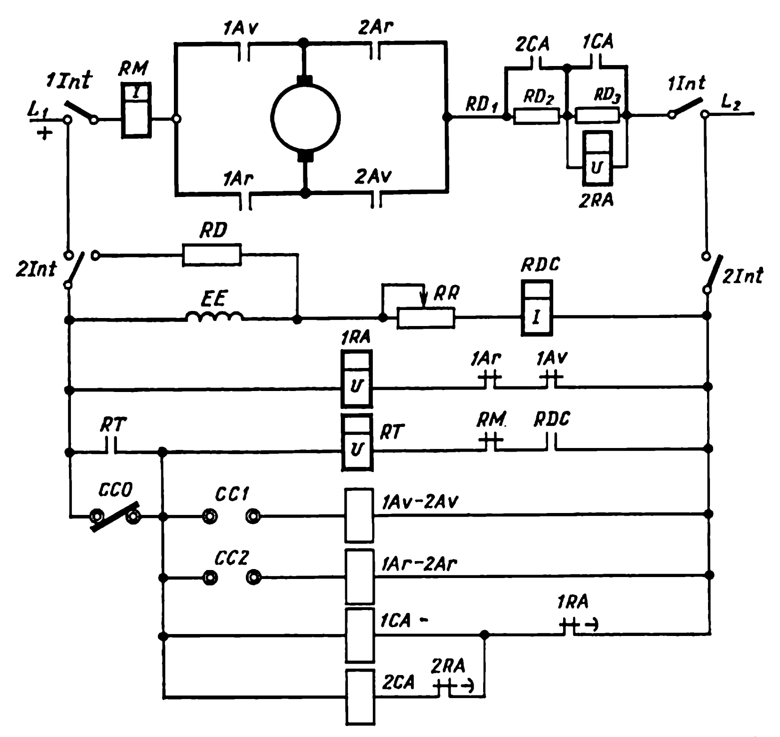


Fig. 418. Schéma de commande d'un moteur à courant continu à excitation en dérivation

« avant » — *CC1*, le contacteur *1Av — 2Av* est excité et ferme ses deux contacts dans le circuit de puissance. Le moteur démarre. Dans la résistance de démarrage du moteur se produit une chute de tension. Il en résulte l'excitation de la bobine du relais *2RA* branchée en parallèle avec le premier échelon de la résistance, laquelle ouvre son contact dans le circuit du contacteur *2CA*. Après l'enclenchement du contacteur *1Av — 2Av* son contact dans le circuit

1RA s'ouvre et le relais *1RA* est débranché. Il s'ensuit que le contact du relais *1RA* se ferme avec un certain retard, le contacteur *1CA* se ferme et shunte par son contact le premier échelon de la résistance de démarrage.

Ensuite le montage fonctionne de façon suivante: le relais *2RA* perd son excitation et ferme avec un certain retard son contact dans le circuit du contacteur *2CA*. Le deuxième échelon de la résistance de démarrage est court-circuité et la tension totale du réseau est appliquée aux balais de l'induit. Pour changer le sens de rotation du moteur, on met la manette du combinateur auxiliaire dans la position « arrière » — *CC2*. Le contacteur *1Ar* — *2Ar* est enclenché et ferme ses contacts dans le circuit de puissance. Le sens du courant dans l'enroulement d'induit du moteur s'inverse. Pour le reste, le montage fonctionne de façon analogue à celle décrite plus haut.

Si le courant du moteur dépasse la valeur préréglée du relais à maximum de courant *RM*, ce dernier ouvre ses contacts dans le circuit *RT* et le moteur est débranché du réseau. La rupture du circuit d'excitation d'un moteur à excitation en dérivation peut provoquer un accroissement de vitesse dangereux. Pour cette raison, en cas de disparition du courant dans l'enroulement d'excitation, le relais *RDC* ouvre son contact dans le circuit *RT* et le moteur est débranché du réseau.

Le réglage de la vitesse de rotation se fait à l'aide de la résistance de réglage *RR*.

4. Schéma de commande non réversible d'un moteur à courant continu à excitation série. Ce schéma (fig. 419) utilise quatre contacteurs: un contacteur de ligne *L*, deux contacteurs d'accélération *1CA* et *2CA* et un contacteur de freinage *F*. Le schéma comprend également cinq relais: deux relais à maximum de courant *1RM* et *2RM*, deux relais d'accélération *1RA* et *2RA* et un relais de freinage *F*.

La fermeture de l interrupteur à couteaux provoque l'enclenchement du relais *1RA*. Le courant passe du fil « + » du réseau par la bobine du relais *1RM*, le relais *1RA*, l enroulement d'induit, l'enroulement d'excitation série *ES*, la résistance de démarrage RD_3 — RD_1 et l'enroulement du relais *2RM* et aboutit au fil « — » du réseau. La résistance de la bobine du relais *1RA* est grande. Pour cette raison, le courant qui passe en ce moment par le circuit ne peut pas mettre le moteur en marche. Une fois

enclenché, le relais *1RA* ouvre son contact dans le circuit des contacteurs *1CA* — *2CA*.

Lorsqu'on appuie sur le bouton « marche », le contacteur de ligne *L* est excité et par son contact principal ferme le circuit du moteur. En même temps, dans le circuit de commande est branché le contact auxiliaire qui shunte le bouton « marche » et ouvre le contact normalement fermé

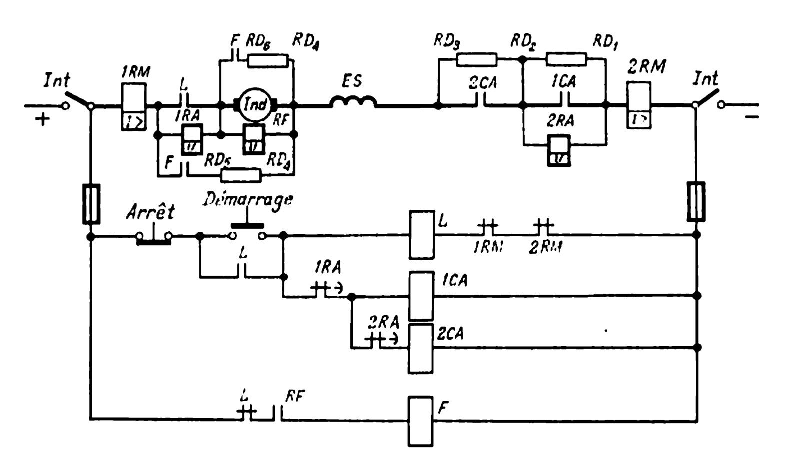


Fig. 419. Schéma de commande non réversible d'un moteur à courant continu à excitation en série

du contacteur *L* dans le circuit du contacteur *F*. Le moteur démarre et son induit se trouve en série avec la résistance de démarrage totale.

La chute de tension dans la résistance de démarrage $RD_3 — RD_1$ crée une différence de potentiel entre les points RD_2 et RD_1 et le relais *2RA* excité ouvre son contact dans le circuit du contacteur *2CA*. L'enclenchement du contacteur de ligne *L* met en court-circuit la bobine du relais *1RA* qui, avec un certain retard, ferme son contact dans le circuit du contacteur *1CA*. La fermeture du contacteur *1CA* dans le circuit de puissance débranche le premier échelon de la résistance de démarrage. De plus, la bobine *2RA* n'étant plus excitée ferme avec un certain retard son contact normalement fermé dans le circuit du contacteur *2CA*. Ce dernier court-circuite le deuxième échelon de la résistance de démarrage.

Pendant la marche du moteur le relais *RF* est excité et son contact dans le circuit du contacteur *F* est fermé. Mais le contacteur ne peut pas se fermer, car le contacteur *L* inséré dans son circuit est ouvert lorsque le moteur tourne. On débranche le moteur en appuyant sur le bouton « arrêt ». Dans ce cas, les contacteurs *L*, *1CA* et *2CA* s'ouvrent et le moteur est débranché du réseau. Le relais *RF* est alors excité grâce à la force contre-électromotrice.

Ensuite, le contacteur *F* est excité et ferme ses deux contacts dans le circuit de puissance. Un contact du contacteur *F* ferme l enroulement d'induit du moteur sur la résistance RD_6 — RD_4, et par l'autre contact et la résistance RD_5 — RD_4 se ferme le circuit de l'enroulement d'excitation du moteur.

Le freinage du moteur se fait par fermeture de son induit sur la résistance. La diminution de la vitesse du moteur fait diminuer la force contre-électromotrice et, pour une vitesse égale à environ 20 % de la vitesse nominale, le relais *RF* ouvre le circuit du contacteur *F* et ce dernier débranche le montage.

§ 206. COMMANDE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES À L'AIDE DE COMBINATEURS

Au § 196 nous avons étudié les combinateurs. Pour la représentation schématique on coupe mentalement le combinateur et on le développe sur un plan. Dans ce cas, les segments prennent la forme de rectangles allongés et les doigts du combinateur sont représentés par des cercles. Les doigts du combinateur et les résistances désignés par les mêmes chiffres ne sont généralement pas connectés sur le schéma. Le nombre de positions du combinateur est indiqué par des traits verticaux en pointillé.

La figure 420 représente le schéma de commande d'un moteur à courant continu à excitation série à l'aide d'un combinateur à tambour. Un tel schéma peut être utilisé pour commander le moteur du chariot ou de l'ossature d'un pont roulant. Ce schéma du combinateur comporte des interrupteurs de fin de course *IAv* et *IAr*, un électro-aimant de freinage *EF* et une bobine de soufflage *K*. Le combinateur a six positions pour la rotation du moteur à droite et à gauche. Les contacts des doigts *1-10* du combinateur représentés sur le schéma à droite des segments sont disposés

en réalité suivant une ligne verticale qui correspond à la position zéro.

Fermons l'interrupteur *Int* et mettons le combinateur dans la première position « avant ». Les segments ferment alors les doigts *6* et *7*, *8* et *9*. Le circuit suivant se forme: la barre « + », l'enroulement d'induit du moteur

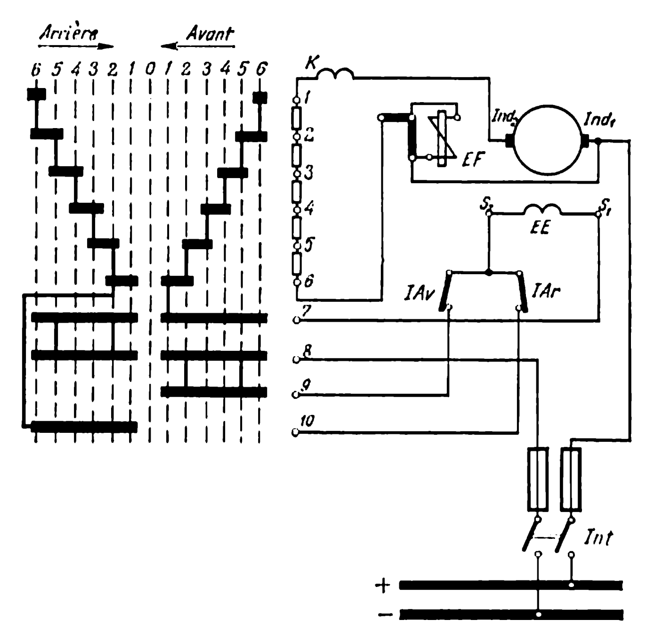


Fig. 420. Schéma de commande d'un moteur à courant continu à l'aide d'un combinateur à tambour

(Ind_1 — Ind_2), la bobine de soufflage *K*, toutes les résistances de démarrage *1-6*, l'enroulement d'excitation du moteur *EE* (S_1 et S_2), l'interrupteur de fin de course de marche avant *IAv* et la barre « — ».

Dans la deuxième position, les segments du combinateur court-circuitent les doigts *5* et *6*, ce qui fait diminuer la résistance de démarrage.

Dans les positions suivantes (troisième, quatrième et cinquième) la résistance de démarrage est court-circuitée par échelons et, enfin, dans la sixième position, elle est entièrement court-circuitée.

Il faut prêter attention au sens du courant dans l'enroulement d'induit et dans l'enroulement d'excitation du moteur. Dans toutes les positions de la marche « avant » le courant dans l'enroulement d'induit circule de Ind_1 à Ind_2 et dans l'enroulement d'excitation de S_1 vers S_2.

Dans la première position de la marche « arrière » le circuit suivant est formé: la barre «+», l'enroulement d'induit, la bobine de soufflage *K*, le doigt *1*, toutes les

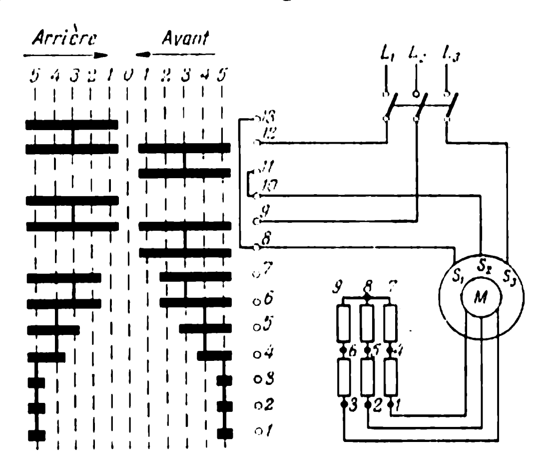


Fig. 421. Schéma de commande d'un moteur asynchrone à rotor bobiné par un combinateur à tambour

résistances de démarrage *1-6*, le doigt *6*, le doigt *10*, l'interrupteur de fin de course arrière *IAr*, l'enroulement d'excitation du moteur (de S_2 à S_1), le doigt *7*, le doigt *8*, la barre « — ». Il est facile de voir que le sens du courant dans l'enroulement d'induit est resté le même, mais a changé dans l'enroulement d'excitation. Pour cette raison, le sens de rotation du moteur doit changer également. L'enroulement de l'électro-aimant *EF* est connecté parallèlement au moteur et assure le déblocage du frein lors de la mise en marche du moteur. Lors du débranchement du moteur, il est freiné mécaniquement.

La figure 421 donne le schéma de commande d'un moteur asynchrone à rotor bobiné à l'aide d'un combinateur à tambour. Dans la première position de la marche « avant », les segments du combinateur court-circuitent les doigts

11 et *12*, *8* et *9*. Les circuits suivants se forment alors: 1) ligne L_1, doigt *12*, doigt *11*, doigt *10*, borne du stator S_2; 2) ligne L_2, doigt *9*, doigt *8*, borne du stator S_1; 3) ligne L_3, borne du stator S_3. Dans le circuit rotorique est insérée toute la résistance de démarrage.

Dans la deuxième position de la marche « avant » les segments court-circuitent les doigts *6* et *7*, ce qui provoque la mise en court-circuit partielle de la résistance de démarrage. Dans les positions suivantes du combinateur la résistance de démarrage est entièrement court-circuitée.

Lorsque le combinateur est placé dans la position « arrière » le schéma fonctionne de façon analogue à la position « avant ». La seule différence est que les phases du stator sont alimentées par d'autres fils du réseau (deux phases sont interverties).

Questions de contrôle

1. Qu'est-ce que la commande électrique?
2. Qu'est-ce que la commande générale, la commande individuelle et la commande par moteurs multiples?
3. D'après quels indices peut-on classer les moteurs électriques?
4. Quelles sont les données indiquées dans les fiches techniques des moteurs électriques?
5. Enumérer les services des moteurs électriques.
6. Quel est l'isolement utilisé dans les machines électriques et quelle est la température maximale admissible pour chaque classe d'isolation?
7. Quels sont les types des machines électriques?
8. Comment sont refroidies les machines électriques?
9. Comment classe-t-on les moteurs d'après leur caractéristique mécanique?
10. Quelles sont les méthodes de freinage des moteurs électriques?
11. Comment peut-on changer le sens de rotation des moteurs électriques?
12. Comment peut-on régler la vitesse de rotation des moteurs électriques?
13. Quels sont les modes de démarrage des moteurs électriques?
14. Quel est l'appareillage de commande des moteurs électriques?

CHAPITRE XVI

BATTERIES D'ACCUMULATEURS

§ 207. GÉNÉRALITÉS

Les batteries d'accumulateurs sont à éléments au plomb ou à éléments alcalins. Les accumulateurs au plomb sont les plus répandus.

Les batteries d'accumulateurs au plomb fixes comprennent des accumulateurs du type C (fixes pour régimes de décharge prolongés) ou CK (fixes pour régimes de décharge courts). Les accumulateurs CK diffèrent des accumulateurs du type C par l'emploi de barrettes de connexion renforcées. Les chiffres après les lettres dans la désignation de ces accumulateurs indiquent leur capacité, le courant de décharge et celui de charge. L'industrie soviétique produit des accumulateurs à désignation de C-1 (CK-1) à C-148 (CK-148).

Les accumulateurs du type C sont prévus pour une décharge de 3 à 10 heures. Le courant de décharge maximal admissible en 3 heures est de 9 A. Les accumulateurs CK peuvent être déchargés durant un temps plus court (jusqu'à une heure); le courant de décharge maximal admissible en 1 heure est de 18,5 A.

Le courant de décharge de courte durée (non supérieure à 5 secondes) ne doit pas dépasser 250 % du courant de décharge en trois heures pour les accumulateurs du type C et 250 % du courant de décharge en une heure pour les accumulateurs CK.

Pendant la charge, on admet un courant de charge maximal de 9 A pour les accumulateurs du type C et de 11 A pour les accumulateurs du type CK.

La valeur de la capacité indiquée pour chaque type d'accumulateurs varie dans de larges limites en fonction de l intensité du courant de décharge et du régime de décharge.

Les principales caractéristiques des accumulateurs C-1 et CK-1 sont données dans le tableau 19.

Tableau 19

Caractéristiques techniques des accumulateurs C-1 et CK-1

Caractéristique	CK-1			C-1 et CK-1		
Durée de la décharge, h	1	2	3	5	7,5	10
Capacité :						
en Ah	18,5	22	27	30	33	36
en % du régime de 10 h	51,4	61,1	75	83,3	91,7	100
Courant de décharge :						
en A	18,5	11	9	6	4,5	3,6
en % du régime de 10 h	514	305	250	166	125	100
Courant maximal, A . . .	11	11	9	9	9	9
Tension à la fin de décharge, V	1,75	1,75	1,8	1,8	1,8	1,8

En utilisant ce tableau, on peut déterminer la capacité et le courant de décharge de chaque accumulateur. Pour cela il faut multiplier les données du tableau par le numéro de l'accumulateur. Par exemple, pour un accumulateur du type CK-6 la capacité pour la décharge en deux heures est: $Q = 22 \times 6 = 132$ Ah et le courant de décharge $I_d = 11 \times 6 = 66$ A.

Les usines soviétiques produisent des accumulateurs au plomb à capacité nominale de 10 heures comprise entre 36 et 5328 Ah. Les données des accumulateurs des types C et CK sont indiquées dans le tableau 20.

Pour les batteries fixes on utilise également des accumulateurs au plomb du type СП (cuirassé) et du type СПК (fixe, cuirassé). Pour les batteries portatives on utilise des accumulateurs au plomb du type CT (batteries de démarrage).

Les batteries d'accumulateurs alcalins comprennent des éléments du type ЖН et du type ТЖН. Les données des accumulateurs au fer-nickel sont indiquées dans le tableau 21.

Le numéro d'un accumulateur correspond à sa capacité nominale indiquée en ampères-heures. Pour les accumulateurs ЖН-22, ЖН-45, ЖН-60 et ЖН-100 la capacité a été déterminée pour un régime de décharge en 8 heures jusqu'à la tension de 1,1 V et pour les accumulateurs ТЖН-250, ЖН-300, ЖН-350 et ЖН-500 pour un régime de décharge en 5 heures jusqu'à la tension de 1 V.

n° de l'accumulateur	Type de plaques	Nombre de plaques dans un accumulateur		Dimensions extérieures du bac, mm			Quantité d'électrolyte, l	Poids total de l'accumulateur, kg
		Positives	Négatives	Longueur	Largeur	Hauteur		
1	И-1	1	2	80	215	270	4,0	14,2
2	И-1	2	3	130	215	270	6,6	22,5
3	И-1	3	4	180	215	270	9,0	30,0
4	И-1	4	5	230	215	270	11,0	36,2
5	И-1	5	6	230	215	270	10,5	41,0
6	И-2	3	4	195	220	485	16,0	51,8
8	И-2	4	5	195	220	485	15,5	60,0
10	И-2	5	6	260	220	485	20,0	76,3
12	И-2	6	7	270	220	485	19,5	84,2
14	И-2	7	8	295	220	485	21,0	93,7
16	И-2	8	9	345	220	485	27,0	112,0
18	И-2	9	10	395	220	485	30,0	126,0
20	И-2	10	11	425	220	485	31,0	133,0

La charge des accumulateurs se fait par un courant de régime de charge normal pendant 6 ou 7 heures. On admet une charge accélérée en régime suivant: d'abord pendant 2,5 h par un courant deux fois supérieur au courant normal et ensuite pendant 2 h par un courant de valeur normale.

On détermine le nombre d'heures du régime de décharge en divisant la capacité de l'accumulateur en Ah par la valeur du courant de décharge en A.

Pour les batteries portatives on utilise des accumulateurs au fer-nickel ЖН-10 à tension de 12,5 V, ЖН-4 de 5 V, ЖН-5 de 6,5 V.

§ 208. RÉDUCTEURS D'ACCUMULATEURS

Lors du fonctionnement d'une batterie d'accumulateurs la tension de chaque élément diminue. Si on ne prend pas de précautions spéciales la tension aux bornes de la batterie

accumulateurs au plomb C et CK

Eléments des accumulateurs du type CK			Eléments des accumulateurs du type C				Courant de charge maximal, A
Charge en 1h		Courant de décharge maximal, A	Décharge de 3 h		Décharge de 10 h		
Capacité, Ah	Courant de charge, A		Capacité, Ah	Courant de décharge, A	Capacité, Ah	Courant de décharge, A	
18,5	18,5	11	27	9	36	3,6	9
37	37	22	54	18	72	7,2	18
55,5	55,5	33	81	27	108	10,8	27
74	74	44	108	36	144	14,4	36
92,5	92,5	55	135	45	180	18	45
111	111	66	162	54	216	21,6	54
148	148	88	216	72	288	28,8	72
185	185	110	270	90	360	36	90
222	222	132	324	108	432	43,2	108
259	259	154	378	126	504	50,4	126
296	296	176	432	144	576	57,6	144
333	333	198	486	162	648	64,8	162
370	370	220	540	180	720	72,0	180

diminue également. Pour cette raison, au fur et à mesure que la batterie se décharge il faut ajouter de nouveaux éléments frais aux accumulateurs en fonctionnement. Ainsi, une batterie d'accumulateurs comprend un certain nombre d'éléments qui fonctionnent de façon continue et plusieurs éléments qui sont mis en circuit ou hors circuit selon les besoins.

L'appareil à l'aide duquel on charge le nombre d'éléments en fonctionnement d'une batterie est appelé *réducteur.*

La figure 422 donne le schéma de branchement d'un réducteur pour un élément. Lors du branchement, la manette du réducteur ne doit pas couper le circuit à courant continu. Pour cela il faut qu'elle soit plus large que la distance entre les contacts. Mais cela provoquerait un court-circuit de 1 accumulateur lors du passage de la manette d'un contact à un autre. Pour cette raison, l'extrémité de la manette comprend deux balais métalliques séparés

Tableau 21

Caractéristiques techniques des accumulateurs au fer-nickel

Type	Capacité nominale, Ah	Courant de charge nominal en régime de 7 h, A	Courants de décharge nominaux (A) et tensions limites correspondantes pour une durée de décharge de					Dimensions, mm			Poids d'un accumulateur, kg	
			8 h jusqu'à 1,1 V	5 h jusqu'à 1,0 V	3 h jusqu'à 0,8 V	2 h jusqu'à 0,65 V	1 h jusqu'à 0,5 V	Largeur	Longueur, tourillon compris	Hauteur, bornes comprises	Sans électrolyte	Avec électrolyte
ЖН-22	22	5,5	2,75	4,4	7,33	11	22	32	125	213	1,41	1,73
ЖН-45	45	11,25	5,65	9	15	22,5	45	53	125	213	2,31	2,85
ЖН-60	60	15,0	7,5	12	20	30	60	45	152	349	3,88	4,78
ЖН-100	100	25,0	12,5	20	33,3	50	100	70	152	349	5,40	6,80
ТЖН-250	250	62,5	31,3	50	83,3	125	250	118,5	176	375	12,6	15
ТЖН-300	300	75,0	37,5	60	100	150	300	118,5	176	440	14,3	18,5
ТЖН-350	350	90,0	43,7	70	115	175	350	141,5	176	520	19,5	25
ТЖН-500	500	125,0	62,5	100	166,5	250	500	141,5	176	550	21,0	28,2

par une distance choisie de façon qu'à l'instant où un balai quitte un contact l'autre balai touche le contact voisin.

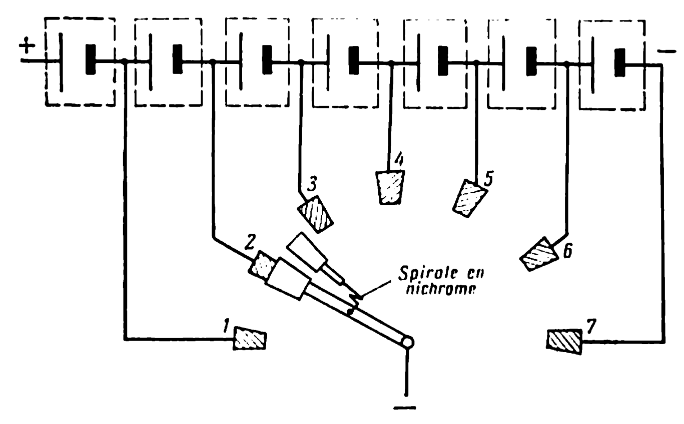


Fig. 422. Réducteur de charge

Les deux balais sont réunis par une spirale en nichrome ou en nickéline. La résistance de la spirale est choisie de sorte qu'à l'instant du court-circuit de l'accumulateur le circuit ne soit pas parcouru par un courant trop fort.

§ 209. RÉCEPTEURS ALIMENTÉS PAR BATTERIES D'ACCUMULATEURS

Dans les centrales et les sous-stations électriques on trouve des récepteurs de courant continu suivants:

1) Charge constante: lampes de signalisation et de contrôle des tableaux de commande, certains relais de protection et d'automatisme, etc.

2) Charge temporaire: elle apparaît lorsque la sous-station cesse d'être alimentée en courant triphasé et comprend des lampes d'éclairage de secours et des moteurs à courant continu.

3) Charge de courte durée: mécanismes d'enclenchement des dispositifs de commande des disjoncteurs, une partie des relais de protection et d'automatisme.

La tension nominale des récepteurs d'énergie du réseau à courant continu est de 12; 24; 48; 110 et 220 V. Pour les petites sous-stations qui comportent des disjoncteurs

à commande à main ou par ressort on utilise la tension de 24 ou de 48 V. Dans les centrales électriques et les grandes sous-stations on utilise pour les services le courant continu sous tension de 110 ou 220 V.

§ 210. GROUPES DE CHARGE

Pour la charge des batteries d'accumulateurs ainsi que pour l'alimentation simultanée des récepteurs à courant continu prévus pour les services de l'installation on utilise des groupes moteurs-générateurs, des redresseurs à vapeur de mercure et des redresseurs au sélénium.

Un groupe de charge moteur-générateur comprend un moteur asynchrone triphasé alimenté par les barres de services auxiliaires et une dynamo à courant continu à excitation en dérivation accouplée avec le moteur asynchrone.

La dynamo doit pouvoir varier sa tension dans de larges limites, ce qui est assuré à l'aide d'un rhéostat de réglage inséré dans le circuit d'excitation: pour la charge des accumulateurs au plomb de 230 à 320 V (pour les batteries de 220 V) ou de 115 à 160 V (pour les batteries de 110 V); pour la charge des accumulateurs au fer-nickel la tension doit varier respectivement de 230 à 440 V ou de 115 à 220 V.

Les redresseurs à vapeur de mercure utilisés pour la charge présentent les avantages suivants par rapport aux groupes moteurs-générateurs: absence des parties tournantes, marche silencieuse, sécurité de service meilleure, rendement plus élevé. Mais les redresseurs à vapeur de mercure ont également des défauts: ils ne peuvent pas soutenir de forts appels de courant, le ballon de verre a une vie réduite (200 h); pour cette raison les redresseurs à vapeur de mercure ne sont utilisés que rarement pour la charge des batteries d'accumulateurs.

Un redresseur au sélénium, en comparaison avec d'autres chargeurs de faible puissance, présente les avantages suivants: très longue durée de vie (jusqu'à 25 000 h), grande sécurité de service, entretien réduit, rendement élevé (80 à 85 %), faibles dimensions et poids, grande capacité de surcharge, absence de pièces fragiles ou sujettes à usure rapide, insensibilité aux trépidations et secousses.

§ 211. RÉGIMES DE FONCTIONNEMENT DES BATTERIES D'ACCUMULATEURS

On utilise deux régimes de fonctionnement des batteries: charge-décharge et charge complémentaire continue.

Régime charge-décharge. Dans ce cas, après la charge de la batterie on débranche le groupe de charge et la batterie alimente des récepteurs permanents (lampes de signalisation, appareils de commande), des récepteurs à service intermittent (dispositifs de commande électromagnétique des disjoncteurs) et des récepteurs mis en service en cas d'urgence. La batterie déchargée jusqu'à une certaine tension est de nouveau connectée au groupe de charge qui tout en chargeant la batterie alimente les autres récepteurs.

Une batterie qui fonctionne d'après la méthode charge-décharge doit subir tous les trois mois une charge d'égalisation (recharge).

Régime de charge complémentaire continue. La batterie est constamment rechargée par un groupe de charge et, pour cette raison, elle est toujours entièrement chargée. Les appels de courant qui ont lieu dans un réseau à courant continu (par exemple, lors du fonctionnement des dispositifs de commande électromagnétique des disjoncteurs de haute tension ou des disjoncteurs rapides) sont absorbés par la batterie d'accumulateurs.

Une batterie qui fonctionne en régime de recharge continue doit être chargée une fois par mois par un chargeur.

En comparant les deux régimes d'utilisation d'une batterie d'accumulateurs on peut indiquer des avantages suivants du régime de recharge continue. L'usure des plaques d'une batterie fonctionnant en ce régime est considérablement inférieure à celle d'une batterie qui fonctionne en régime de charge-décharge. Une batterie en régime de recharge continue est toujours prête à fonctionner, ce qui n'est pas le cas d'une batterie fonctionnant en régime de charge-décharge. Il se peut qu'une batterie déchargée et préparée pour être branchée pour la charge doive fournir une puissance qu'elle ne peut pas donner. Pour cette raison, les batteries d'accumulateurs fonctionnent surtout en régime de recharge continue.

Pour assurer le régime charge-décharge on utilise un schéma d'une batterie d'accumulateurs à double réducteur

(fig. 423). Comme chargeur on utilise un groupe moteur-générateur. La dynamo est connectée aux barres par l'intermédiaire d'un coupe-circuit, d'un disjoncteur à maximum de

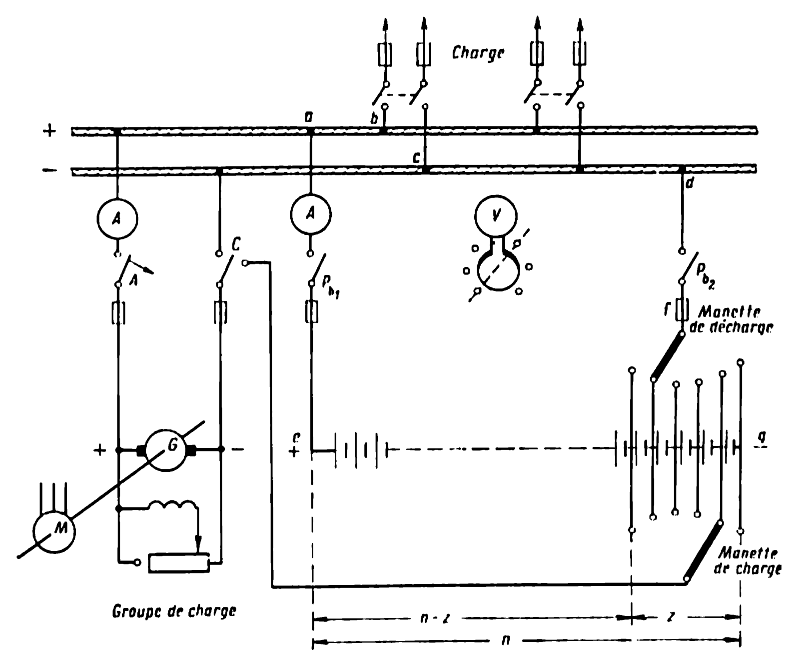


Fig. 423. Schéma d'une installation à batterie d'accumulateurs à double réducteur

courant avec relais à retour de courant, d'un ampèremètre et d'un commutateur C à deux positions.

Le disjoncteur à maximum de courant protège la dynamo contre les surcharges.

Le relais à retour de courant débranche la dynamo si sa F.É.M. devient inférieure à la tension aux bornes de la batterie. Cela peut arriver lorsque la vitesse de la dynamo diminue, ainsi qu'en cas de disparition du courant alternatif alimentant le moteur, etc. Si à ce moment on ne débranche pas la dynamo, elle passera en régime moteur et sera alimentée par la batterie.

Le réducteur comporte deux manettes dont l'une est destinée à la charge et l'autre à la décharge. Les deux manet-

tes sont calées sur le même axe et peuvent tourner indépendamment l'une de l'autre.

Le nombre total d'accumulateurs réunis dans une batterie doit être tel que les éléments, même déchargés jusqu'à la tension minimale u_d, puissent assurer aux barres de la batterie la tension nominale U_b (115 ou 230 V).

Nous avons déjà indiqué que la tension minimale au-dessous de laquelle on ne peut pas décharger un accumulateur est de 1,75-1,8 V pour les accumulateurs au plomb et de 0,9-1 V pour les accumulateurs alcalins.

On détermine le nombre total n d'éléments d'une batterie en partant de la condition suivante:

$$n = \frac{U_b}{u_d}.$$

Par exemple, pour $U_b = 115$ V et $u_d = 1,8$ V, le nombre d'éléments doit être:

$$n = \frac{115}{1,8} = 64.$$

Généralement, on prend 66 accumulateurs.

Selon le schéma représenté par la figure 423 on peut réaliser les modes de travail suivants:

1) la batterie d'accumulateurs fonctionne seule, en alimentant les récepteurs;

2) le groupe de charge fonctionne seul, en alimentant les récepteurs;

3) le groupe de charge fonctionne en parallèle avec la batterie d'accumulateurs; le groupe et la batterie alimentent ensemble les récepteurs;

4) le groupe charge la batterie, en alimentant simultanément les autres récepteurs.

Examinons séparément chacun des cas énumérés.

Décharge de la batterie. Le groupe de charge ne fonctionne pas. Le disjoncteur *A* (fig. 423) et le commutateur *C* sont ouverts. La manette de décharge est mise dans la position extrême gauche. Les interrupteurs à couteaux P_{b_1} et P_{b_2} sont fermés. Au fur et à mesure que la batterie se décharge, on déplace la manette à droite pour maintenir constante la tension aux barres. C'est ainsi qu'on introduit en circuit des accumulateurs frais.

Le groupe de charge débite seul dans le réseau. Le disjoncteur *A* est fermé, le commutateur *C* se trouve dans la

position gauche. Les interrupteurs de la batterie P_{b1} et P_{b2} sont ouverts.

Marche en parallèle de la dynamo et de la batterie pour alimenter le réseau. Le groupe de charge fonctionne. Le disjoncteur A est fermé. Le commutateur C est dans la position gauche. Les interrupteurs P_{b1} et P_{b2} sont fermés.

Le groupe charge la batterie et alimente le réseau. Si le réseau demande une faible puissance, le groupe peut fournir du courant au réseau et en même temps charger la batterie d'accumulateurs. Mais, à la fin de la charge, la dynamo fournit une tension supérieure à celle sous laquelle le réseau fonctionne normalement. Si on introduit un rhéostat dans le circuit on peut diminuer la tension grâce à la chute de tension dans le rhéostat. Mais cela n'est pas économique. Cependant, en utilisant un réducteur à deux éléments on peut résoudre facilement le problème de fonctionnement de la dynamo devant simultanément alimenter le réseau et charger la batterie d'accumulateurs. Ce réducteur permet d'utiliser la différence entre la tension de la dynamo et la tension du réseau pour charger un groupe d'accumulateurs connectés au réducteur.

Le nombre d'accumulateurs z connectés au réducteur peut être déterminé par le raisonnement suivant. Le nombre d'accumulateurs de la batterie fonctionnant en permanence est égal à $n - z$. Lorsque la dynamo débite à la fois dans la batterie et dans le réseau, ce groupe d'accumulateurs est connecté en parallèle avec les barres de l'installation. Pour cette raison, la tension aux barres U_b, à la fin de la charge, doit être égale à la tension correspondant au groupe d'accumulateurs fonctionnant en permanence.

Le nombre d'accumulateurs réunis au réducteur est déterminé par l'expression suivante:

$$z = n - \frac{U_b}{u_{ch}}.$$

Par exemple, pour $U_b = 115$ V, $n = 64$ et $u_{ch} = 2,7$ V, on a:

$$z = 64 - \frac{115}{2,7} = 21 \text{ éléments.}$$

Dans ce cas on prend généralement 22 éléments, ce qui fait un tiers de toute la batterie d'accumulateurs.

Pour faire fonctionner la dynamo pour la charge de la batterie et pour l'alimentation du réseau on met en marche

le moteur asynchrone et en réglant l'excitation de la dynamo on règle aux barres de la batterie la tension nominale. On ferme le disjoncteur A, on met le commutateur C dans la position droite et on ferme les interrupteurs P_{b1} et P_{b2}.

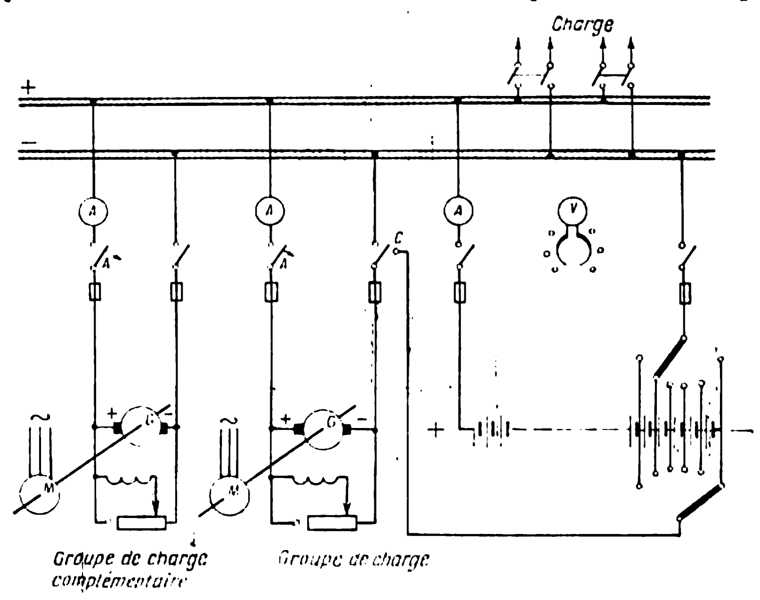


Fig. 424. Schéma d'une batterie d'accumulateurs fonctionnant en régime de recharge continue

La manette de charge du réducteur est mise dans la position extrême droite et la manette de décharge est mise un peu à gauche de la manette de charge.

Le courant I débité par la dynamo comprend le courant I_r absorbé par les récepteurs et le courant de charge I_{ch} de la batterie. Le courant de la dynamo se divise depuis le point a en deux parties: depuis le point b il va au réseau et par les points c et d il arrive à la manette de décharge (point f). Le courant de charge I_{ch} se dirige depuis le point a par la batterie vers le point f. Entre les points f et g, par les accumulateurs connectés entre les deux manettes du réducteur, circule le courant de charge et le courant alimentant le récepteur, c'est-à-dire le courant total de la dynamo. Afin que les accumulateurs connectés au réducteur ne soient pas endommagés par suite de la surcharge on les choisit de façon qu'ils

admettent un courant de charge plus grand. Au fur et à mesure que la batterie se charge, les manettes de charge et de décharge sont déplacées à gauche.

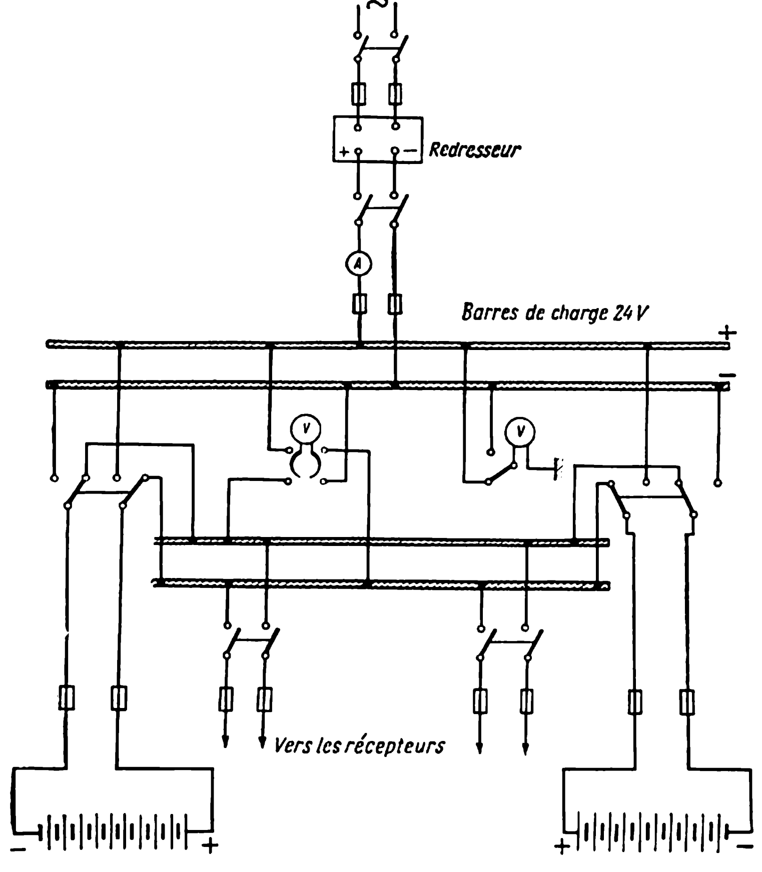


Fig. 425. Schéma d'une installation à batterie d'accumulateurs de faible puissance

La figure 424 donne le schéma d'une batterie d'accumulateurs fonctionnant normalement en régime de recharge continue. Le schéma permet également d'utiliser la batterie en régime de charge-décharge. Un groupe de charge auxiliaire de faible puissance y fonctionne de façon permanente.

Ce groupe est mis en circuit seulement lorsque la batterie fonctionne en régime de charge-décharge. Le groupe de charge auxiliaire est une réserve pour le groupe de charge.

Les batteries d'accumulateurs de 24 ou de 48 V de faible puissance se composent chacune de deux groupes qui sont chargés et déchargés à tour de rôle. La figure 425 donne le schéma d'une installation à batterie d'accumulateurs de faible puissance.

§ 212. LOCAL POUR BATTERIES D'ACCUMULATEURS

Les batteries d'accumulateurs doivent être installées dans un local spécial dans le sous-sol ou au rez-de-chaussée du bâtiment de la centrale ou de la sous-station. Ce local doit être sec et ne pas être soumis aux variations brusques de la température, aux trépidations ou aux vibrations. L'entrée dans le local se fait par un sas. Sur la porte on accrochera des pancartes avec les inscriptions suivantes: « Salle d'accumulateurs », « Danger d'incendie », « Ne pas entrer avec du feu », « Défense de fumer ».

La température dans le local au niveau d'emplacement des accumulateurs ne doit pas être inférieure à 10 °C.

Les murs et le plafond, les portes et les fenêtres, les conduites de ventilation et les autres parties du local doivent être périodiquement couverts d'une peinture antiacide (lorsqu'il s'agit d'accumulateurs au plomb).

Pour l'installation d'éclairage dans les locaux comportant des accumulateurs on utilise des câbles CPГ et BPГ. L'armature d'éclairage doit être antidéflagrante. Les interrupteurs, les prises de courant et les coupe-circuit sont montés hors de la salle d'accumulateurs.

La salle d'accumulateurs doit avoir un système de ventilation par aspiration et refoulement.

En hiver, il est recommandé d'assurer l'échauffement de l'air arrivant dans la salle d'accumulateurs à l'aide d'un calorifère.

Le plancher de la salle d'accumulateurs doit être en asphalte ou recouvert de carreaux en grès cérame.

Les bacs d'accumulateurs sont placés sur des chantiers en bois que l'usine fournisseuse livre avec les accumulateurs. Les accumulateurs sont installés sur les chantiers en un ou deux niveaux. Entre les chantiers et le plancher on place des plaques isolantes en verre.

Les bacs de verre des accumulateurs sont posés sur des isolateurs en porcelaine qui s'appuient sur les chantiers.

Les barres dans la salle d'accumulateurs sont en fils de cuivre nus montés sur les isolateurs du type TФ. La connexion entre la salle d'accumulateurs et le réducteur monté sur le tableau de commande se fait à l'aide d'une plaque de traversée fixée sur la paroi du local. On réserve dans la salle d'accumulateurs un endroit spécial pour y conserver les bouteilles avec l'acide sulfurique et l'eau distillée.

Questions de contrôle

1. Quelles sont les principales caractéristiques des accumulateurs?
2. Indiquer l'organisation des réducteurs d'accumulateurs et leur destination.
3. Enumérer les récepteurs alimentés par les batteries d'accumulateurs.
4. Indiquer les sources de courant utilisées pour la charge des batteries d'accumulateurs.
5. Quels sont les régimes de fonctionnement des batteries d'accumulateurs et leurs caractéristiques?
6. Indiquer l'organisation d'une salle d'accumulateurs.

CHAPITRE XVII

RÈGLES DE SÉCURITÉ DANS LES INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES

§ 213. PRINCIPALES RÈGLES DE SÉCURITÉ

L'entretient des installations électriques ne présente aucun danger lorsque le personnel de service observe rigoureusement les règles d'exploitation et de sécurité. A cette fin, on permet d'y travailler seulement aux personnes ayant étudié les règles de sécurité et obtenu le certificat correspondant.

Une fois par an (ou tous les six mois) le personnel desservant les installations électriques subit un examen en règles de sécurité. Tous les travaux sur les installations à haute tension seront faits, d'après les bons de travail spéciaux, par deux personnes au moins avec utilisation obligatoire des moyens de protection nécessaires.

On appelle moyens de protection les dispositifs dont l'isolation supporte de façon sûre la tension de service de l'installation et avec lesquels on peut toucher les pièces sous tension.

Pour n'importe quelle tension de service les principaux moyens de protection sont les perches isolantes utilisées pour les opérations de commutation, pour les mesures, pour la connexion des fils de mise à la terre et autres opérations, ainsi que les pinces isolantes pour la manœuvre des coupe-circuit. Dans les installations à basse tension on utilise encore des gants et des moufles isolants et des outils à poignées isolantes.

Les moyens de protection complémentaires sont ceux qui ne peuvent pas protéger contre l'électrocution et servent seulement à améliorer l'action des principaux moyens de protection ainsi que pour la protection contre la tension de contact, la tension de pas et les brûlures par un arc électrique. Les moyens de protection complémentaires dans les installations à haute tension sont: gants isolants, bottes isolantes, tapis en caoutchouc et supports isolants.

Lors de toutes les opérations sur les installations à haute tension les principaux moyens de protection doivent être utilisés ensemble avec les moyens complémentaires. Les moyens de protection en service et ceux de réserve doivent être numérotés et leur état doit être vérifié périodiquement.

Toutes les installations dans lesquelles la tension entre un fil quelconque et la terre ne dépasse pas 250 V sont classées comme installations à basse tension. Toutes les autres installations sont considérées comme installations à haute tension.

Dans les installations à basse tension toutes les pièces sous tension doivent être protégées contre un contact accidentel. Ainsi, les couteaux des interrupteurs, les contacts des rhéostats doivent être munis de dispositifs de protection.

Lors du travail dans des locaux humides ainsi que dans des installations mises à la terre (chaudières, ponts, etc.) il faut utiliser les transformateurs abaisseurs (12 V et 24 V).

Tous les objets métalliques situés au voisinage des pièces sous tension et pouvant être mis accidentellement en contact avec ces dernières doivent être mis à la terre.

Il est défendu de faire des réparations sur des machines et appareils tournants en marche, sauf le polissage des bagues de frottement et des collecteurs.

Les travaux de réparation et de montage doivent être faits après le débranchement de l'équipement. Si, pour une raison quelconque, on ne peut pas débrancher l'équipement, il faut lors du travail avec l'équipement sous tension observer les règles de sécurité en utilisant les dispositifs de protection (tapis isolant, bottes isolantes, outils à poignées isolantes, gants de caoutchouc, dispositifs pour la mise à la terre et le court-circuitage, perches isolantes et lunettes de protection).

Aux endroits convenables il faut placer des pancartes métalliques avec une « tête de mort » et portant l'inscription « Ne pas toucher, danger de mort » ou « Haute tension, danger de mort ». Ces pancartes doivent être suffisamment grandes et les lettres de grandes dimensions doivent être portées à peinture indélébile. Les dimensions minimales des pancartes sont de 20 × 10 cm.

Lors du travail avec l'équipement à haute tension il faut observer les mesures de protection suivantes:

a) le travail doit être fait par un groupe d'ouvriers (deux au moins) afin que l'un puisse aider l'autre en cas d'accident;

b) les ouvriers doivent être bien isolés par rapport à la terre;

c) pendant le travail, les ouvriers ne doivent pas toucher les pièces métalliques des machines, les conduites, etc., ainsi que les personnes qui ne sont pas isolées;

d) avant le commencement du travail, tous les dispositifs de protection doivent être minutieusement vérifiés par les ouvriers eux-mêmes.

Il est formellement interdit de commencer le travail dans les installations à haute tension (sous-station, postes de transformation, cellules, etc.) avant d'avoir obtenu un ordre verbal ou écrit du conducteur des travaux et une notice indiquant que la tension a été coupée et qu'on peut commencer le travail.

Avant de commencer le travail dans les installations à haute tension, il faut s'assurer à l'aide des appareils correspondants que la tension est absente dans la partie de l'installation où les travaux seront exécutés. A cette fin, il faut décharger les barres collectrices et les câbles des transformateurs, les vérifier pour un court-circuit, les court-circuiter et les mettre à la terre.

Avant de commencer le travail il faut vérifier la résistance des échelles, des échafaudages, des câbles d'acier.

Nous avons énuméré ici quelques règles de sécurité concernant les travaux de montage dans les installations à basse et à haute tension.

§ 214. ÉLECTROCUTION

Chaque ouvrier qui travaille dans les installations électriques doit être renseigné sur le danger mortel du courant.

Un homme peut être électrocuté par suite du contact avec les pièces qui normalement sont sous tension et par suite du contact avec les pièces qui normalement ne sont pas sous tension, mais peuvent l'être accidentellement à cause de l'endommagement de l'isolation (par exemple, les enveloppes des machines et des appareils).

Un homme électrocuté perd connaissance et souvent ne donne aucun signe de vie (il ne respire pas, et son cœur ne bat pas).

Dans des cas peu graves, la perte de connaissance dure quelques secondes seulement et la victime revient à elle

sans aucune aide. Dans les cas graves, la connaissance ne revient pas au bout de quelques secondes et dans ce cas un secours urgent, énergique et qualifié est nécessaire. Tout retard provoque la mort de l'électrocuté.

Souvent la mort due au courant électrique est apparente. Seul un médecin peut décider si tout effort pour ranimer la victime est inutile et en constater la mort.

Pour cette raison en cas d'électrocution il faut écarter rapidement la victime des pièces sous tension et commencer à faire immédiatement la respiration artificielle, même si la victime semble morte, jusqu'à sa ranimation ou jusqu'à l'apparition des signes de mort incontestables parmi lesquels il faut noter en premier lieu les taches cadavériques qui n'apparaissent que plusieurs heures après la mort.

La cause principale de la mort apparente est l'arrêt de la respiration. Pour cette raison la vie de la personne électrocutée dépendra de la vitesse avec laquelle on pourra rétablir sa respiration.

Le principal moyen de ranimer une victime d'électrocution est la respiration artificielle qui consiste à copier la respiration naturelle.

§ 215. PREMIERS SOINS ET SECOURS AUX ÉLECTROCUTÉS

La principale condition de secours efficace à une victime d'électrocution est sa séparation rapide des pièces sous tension.

Séparation de la victime de la pièce sous tension. En premier lieu il faut débrancher rapidement la partie de l'installation avec laquelle la victime est en contact.

Si la victime peut alors tomber d'une certaine hauteur il faut prévenir sa chute ou la rendre non dangereuse.

Si on ne peut pas débrancher rapidement l'installation il faut écarter la victime des pièces sous tension.

Installation à basse tension. Pour écarter la victime des pièces sous tension ou d'un fil il faut utiliser un bâton sec, une planche, une corde, des vêtements ou un autre isolant sec. On ne doit pas se servir d'objets métalliques ou humides.

Pour écarter la victime des pièces sous tension on peut la tirer par ses vêtements s ils sont secs et ne touchent pas le

corps, par exemple par les pans de ses habits sans toucher les pièces métalliques voisines et les parties nues du corps. On peut tirer la victime par les pieds seulement lorsque les mains du sauveteur sont bien isolées.

Pour s'isoler de la terre et du corps de la victime, le sauveteur peut mettre des bottes de caoutchouc ou se mettre sur une planche sèche ou une autre cale sèche non conductrice, mettre des gants en caoutchouc ou envelopper ses mains avec un tissu caoutchouté ou un autre tissu sec.

Lorsque le courant passe par la victime dans la terre on peut couper le courant en séparant la victime de la terre. Il faut alors observer toutes les mesures de sécurité indiquées plus haut.

En cas de nécessité il faut couper les fils (on coupera chaque fil séparément) avec une hache ayant un manche sec ou par un autre outil isolant en prenant des précautions nécessaires pour s'isoler de la terre.

Installations à haute tension. Mettre des bottes de caoutchouc, des gants et agir à l'aide d'une perche ou de pince prévues pour la tension correspondante.

Lignes aériennes. Si on ne peut pas soustraire la victime des effets du courant rapidement par un autre moyen il faut court-circuiter les fils de la ligne.

Premiers soins

a) Si la victime est revenue à elle, mais s'est trouvée précédemment longtemps sans connaissance ou sous tension, il faut lui assurer un repos complet jusqu'à l'arrivée d'un médecin sous la surveillance duquel elle doit se trouver pendant 2 à 3 heures. Lorsqu'il est impossible de faire venir rapidement un médecin il faut amener d'urgence la victime dans un hôpital.

b) Lorsque la victime a perdu connaissance, mais respire il faut la placer sur un matelas. Déboutonner les vêtements et assurer l'arrivée de l'air frais, ne laisser sur place que des personnes indispensables. Faire respirer de l'ammoniaque, verser de l'eau froide sur le visage, frotter et réchauffer le corps avec des tissus de laine propres, ensuite couvrir la victime avec une couverture. Faire venir d'urgence un médecin.

c) Si la victime respire mal (respiration rare, par saccades) il faut appliquer la respiration artificielle.

d) Si les dents sont serrées il faut ouvrir la bouche et pour cela faire avancer la mâchoire inférieure. Pour soulever et

faire avancer la mâchoire on applique les pouces contre les bords de la mâchoire et on la fait avancer de façon que les dents inférieures soient devant les dents supérieures (fig. 426).

Si on n'arrive pas de cette façon à ouvrir la bouche de la victime, il faut placer entre les dents (doucement, afin de ne pas les casser) une planchette, une plaque métallique, la poignée d'une cuillère et les faire desserrer.

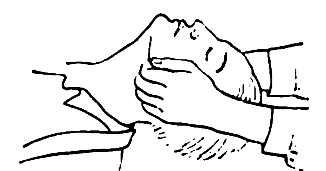


Fig. 426. Ouverture de la bouche d'un électrocuté

e) En l'absence de respiration, de battement de cœur, de pouls, on ne doit pas considérer la victime comme morte. Souvent la mort n'est qu'apparente. Seul un médecin peut juger de l'état de la victime.

Lors de la ranimation de la victime chaque seconde est précieuse et, pour cette raison, il faut donner les premiers soins et appliquer la respiration artificielle immédiatement et de façon continue sur place. On peut transporter la victime seulement à titre d'exception lorsqu'il est dangereux de la laisser sur place.

On appliquera la respiration artificielle de la victime soit jusqu'à sa ranimation, soit jusqu'à l'apparition des signes incontestables de mort (taches cadavériques ou rigidité cadavérique).

Lorsque la victime commence à respirer, il est nuisible de continuer la respiration artificielle, mais si la respiration redevient faible ou s'arrête il faut de nouveau recommencer à faire la respiration artificielle.

La victime qui a repris connaissance sera couverte d'une couverture et on lui donnera des boissons chaudes et 15 à 20 gouttes de valériane.

Toute personne ayant souffert même légèrement par suite de contact avec le courant sera amenée chez le médecin pour observation.

Premiers soins en cas de brûlure

1. Panser les endroits brûlés comme une blessure en utilisant un paquet de premier secours.

2. En cas de grandes brûlures, ne pas déshabiller la victime, ne pas enlever les vêtements collés aux plaies et

mettre au-dessus de la civière une bâche qui ne touchera pas le corps de la victime, donner à boire et faire venir un médecin.

Méthodes de respiration artificielle

Première méthode: le secours est porté par une seule personne (fig. 427).

Coucher la victime sur le ventre, la tête posée sur un bras, la figure tournée sur le côté et mettre un morceau d'étoffe sous la tête. Ensuite, faire avancer le second bras, tirer

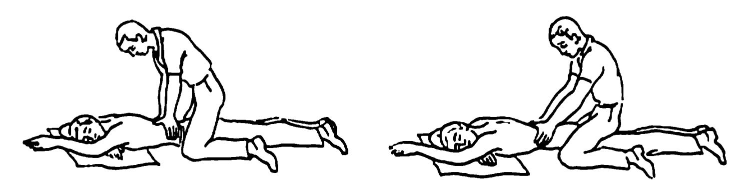


Fig. 427. Première méthode de respiration artificielle (appliquée par une seule personne)

la langue, mais sans la retenir. Se mettre à genoux, à cheval sur la victime, le visage étant dirigée vers la tête de la victime de façon que ses hanches se trouvent entre les genoux du sauveteur. Mettre les paumes sur le dos de la victime, sur les côtes inférieures. En comptant « un », « deux », « trois », incliner progressivement le corps en avant de façon à appuyer par le corps sur les bras tendus et à presser sur les côtes inférieures de la victime (expiration). Sans enlever les mains du dos de la victime, se renverser en arrière (aspiration).

En comptant « quatre », « cinq », « six », appuyer de nouveau lentement sur les bras tendus en comptant « un », « deux », « trois », etc. Répéter ces opérations lentement à un rythme de douze à quinze fois par minute.

Si la victime a des côtes brisées ou le dos brûlé ne pas utiliser cette méthode.

Seconde méthode (fig. 428). Deux hommes doivent coucher la victime sur le dos, ayant mis préalablement sur le sol des vêtements chauds et sous les omoplates un paquet de vêtements de sorte que la tête soit renversée en arrière. Ouvrir et nettoyer la bouche et sortir éventuellement le râtelier. Sortir et maintenir la langue en la tirant légèrement vers le menton. S'agenouiller du côté de la tête

de la victime, prendre ses bras près des coudes et en comptant « un », « deux », « trois », soulever les bras de la victime et les rejeter en arrière (aspiration).

En comptant « quatre », « cinq », « six », appuyer légèrement les bras latéralement (expiration), etc.

Lorsque la respiration artificielle est faite correctement on entend un son dû au passage de l'air par le larynx lorsque le torax est comprimé et déprimé.

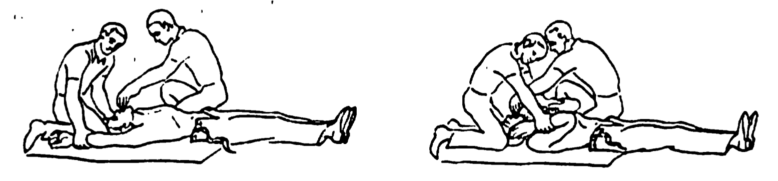


Fig. 428. Seconde méthode de respiration artificielle (appliquée par plusieurs personnes).

L'absence de sons prouve que la langue se trouve en arrière et s'oppose au passage de l'air.

Lorsqu'un bras ou une clavicule est brisé, il ne faut pas utiliser la deuxième méthode.

Lorsque trois personnes sont présentes, deux assurent la respiration artificielle en tenant chacun un bras de la victime; la troisième tient la langue tirée.

Quelle que soit la méthode de respiration utilisée, il faut éviter une compression excessive du torax, car dans ce cas on risque de briser les côtes de la victime ou de faire sortir la nourriture de l'estomac de sorte à obstruer les voies respiratoires.

Il ne faut pas agiter brusquement les bras de la victime afin d'éviter des luxations.

ANNEXES

1. PRINCIPALES ABRÉVIATIONS DES UNITÉS PHYSIQUES

Nom	Symbole	Nom	Symbole
Gramme (masse) . .	g	Milliwatt	mW
Kilogramme (masse)	kg	Microwatt	μW
Milligramme (masse)	mg	Electron (charge) . .	e
Gramme (force) . . .	gf	Coulomb	C
Kilogramme (force)	kgf	Ampère-seconde . . .	As
Mètre	m	Ampère-heure	Ah
Kilomètre	km	Watt-seconde	Ws
Décimètre	dm	Joule	J
Centimètre	cm	Watt-heure	Wh
Millimètre	mm	Hectowatt-heure . .	hWh
Mètre carré	m²	Kilowatt-heure . . .	kWh
Centimètre carré . .	cm²	Voltampère	VA
Millimètre carré . .	mm²	Kilovoltampère . . .	kVA
Ohm	Ω	Voltampère réactif	VAr
Kiloohm	kΩ	Kilovoltampère réactif	kVAr
Mégohm	MΩ	Farad	F
Ampère	A	Microfarad	μF
Kiloampère	kA	Picofarad	pF
Milliampère	mA	Henry	H
Microampère	μA	Hertz	Hz
Volt	V	Kilohertz	kHz
Kilovolt	kV	Mégahertz	MHz
Millivolt	mV	Weber	Wb
Microvolt	μV	Maxwell	Mx
Watt	W	Gauss	Gs
Hectowatt	hW	Œrsted	Œ
Kilowatt	kW	Calorie	cal
Mégawatt	MW	Kilocalorie	kcal

2. SYMBOLES DES PRINCIPALES GRANDEURS ÉLECTRIQUES

Nom	Symbole
Capacité électrique	C
Inductance ; coefficient d'auto-induction	L
Induction magnétique	B
Quantité d'électricité ; charge électrique	Q, q
Coefficient de température de résistance électrique, équivalent électrochimique	α
Puissance active	P
Puissance réactive	Q
Puissance apparente	S
Puissance instantanée	p
Tension électrique	U, u
Intensité de champ magnétique	H
Intensité de champ électrique	E
Densité de courant	δ
Flux magnétique	Φ
Encerclement magnétique ; flux magnétique total	Ψ
Conductance électrique	g
Permittivité électrique relative	ε
Perméabilité magnétique relative	μ
Différence de phase entre tension et courant ; potentiel	φ
Force électromotrice	E, e
Résistance ohmique	r
Réactance	x
Impédance	z
Résistivité	ρ
Intensite du courant	I, i
Phase initiale	ψ
Fréquence	f
Pulsation	ω
Nombre de spires d'un enroulement	w
Coefficient de proportionnalité	c

3. RÉPONSES NUMÉRIQUES AUX PROBLÈMES

(Certaines réponses sont données en chiffres arrondis)

Chapitre I

1. $1{,}35N = 137{,}7$ G
2. 18,15 dynes
3. 9 cm
4. $4{,}5 \cdot 10^3$ V/cm
5. $4 \cdot 10^{-8}$ C
6. 10^5 V
7. 150 J
8. 4 μF
9. $\frac{1}{300}$ μF

Chapitre II

1. 16,55 ohms
2. 3,6 ohms
3. 0,1 mm²
4. 10,9 m
5. Fer
6. 0,25 mm²
7. 1550 ohms
8. 2,2 mm²
9. 50 °C
10. 13,06 m

11. 28 V
12. 5,8 ohms
13. 1600 ohms
14. 6 ohms
15. 22,4 V ; 9,6 V ; 6,4 V
16. 270,4 ohms
17. 0,8 ohm
18. 0,88 ohm
19. 24,5 ohms
20. 12 ohms
21. 5 ohms
22. 7,96 ohms
23. 2,47 ohms
24. 4,5 A
25. 6 ohms
26. 9,25 A ; 2,06 A ; 3,09 A ; 5,76 A ; 2,88 A ; 1,92 A ; 3,84 A
27. 114,4 V
28. 3,81 A ; 5,71 A ; 7,62 A ; 286 A
29. 35 mm²
30. 226 V
31. 600 Wh
32. 242 ohms
33. 25 A
34. 4,4 kWh
35. 1 rouble 49 copecks
36. 24 mm² ; 5,46 kW ; 460 W
37. 17,5 mm²
38. 7,73 ch
39. 8,8 kW

Chapitre III

1. 16,9 mg
2. 1976 mg
3. 109,5 mn
4. 350 mn
5. 0,225 A
6. 1 A ; 0,297 A
7. 0,5 A ; 4,2 A
8. 2 A ; 9,99 V ; 20 W

Chapitre IV

1. 520 kcal
2. 378 cal
3. 881,6 cal ; 352,7 cal ; 1728 cal ; 4320 cal
4. 79,2 kcal
5. 38,9 ; 25,9 ; 12,9 cal
6. 14,7 kcal
7. 10 m

Chapitre V

1. 159 A/m
2. 200 A/m
3. 15 $\pi \cdot 10^{-5}$ Wb
4. 5 N
5. $2 \cdot 10^{-4}$ N

Chapitre VI

1. 0,375 V
2. 12 V
3. 1 kV
4. 3 H

Chapitre VII

1. 50 Hz
2. 240 tr/mn
3. 20 pôles
4. 66,3 V
5. 50 V
6. 76 ohms ; 30 ohms ; 69,7 ohms
7. 62 V
8. 11,5 A
9. 204 W; 240 VA
10. 2,75 ohms ; 2,5 ohms ; 1,14 ohm ; 4400 VA ; 0,91 ; 1825 VAr ; 45,5 V ; 100 V
11. 52,1 A
12. 200 ; 160 ; 120 ; 80 ; 40 kW
13. 83,5 V; 8,35 ohms ; 2,5 ohms ; 7,96 ohms
14. 1,5 ohm ; 2 ohms ; 2,5 ohms ; 160 VA ; 96 W ; 128 VAr
15. 2400 VA ; 1920 W ; 1440 VAr ; 6 ohms ; 4,8 ohms ; 3,6 ohms ; 96 V ; 72 V
16. 8941 W
17. 960 W ; 1760 VA ; 1472 VAr ; 27,5 ohms ; 23 ohms ; 0,545 ; 120 V ; 184 V
18. 19,2 ohms ; 14,4 ohms ; 24 ohms
19. 0,33 ; 119,5 V ; 50 W ; 150 W
20. 59,75 V ; 18 W ; 18 W

Chapitre VIII

1. 127 V ; 35,4 A
2. 8,65 A
3. 50 kW ; 40 kW ; 30 kW ; 10 kW
4. 17,75 A
5. 4774 W ; 6,2 kVA
6. 3733 W ; 11,2 kW
7. 240 lampes
8. 7,25 A
9. 2,59 kW
10. 323,5 W
11. 276 lampes

Chapitre IX

1. 17,4 ; 12,65 V
2. 0,485 A
3. 0,26 A
4. 94 %
5. 6,07 A
6. 534 spires
7. 4,78 A ; 188 A
8. 10,4 A ; 2,4 A

Chapitre XIV

1. $\Delta_{abs} = -0,1$ A; $\Delta_{rel} = -0,01$; $\Delta_{réd} = 0,005$
2. 0,004 ohm
3. 78 A
4. 14 kΩ
5. 5340 ohms
6. $\Delta_{abs} = -0,25$ W; $\Delta_{rel} = 0,0042$
7. 2850 V
8. 120 A
9. 420 A
10. 45 kW
11. 142,56 kW
12. 18 kW

INDEX

TABLE DES MATIERES

Chapitre premier

ÉLECTROSTATIQUE

Chapitre II

LOIS FONDAMENTALES DU COURANT CONTINU

Chapitre III

ACTIONS CHIMIQUES DU COURANT. PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES ET ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES

Chapitre IV

·CTIONS THERMIQUES DU COURANT

Chapitre V

ÉLECTROMAGNÉTISME

Chapitre VIII

COURANT TRIPHASÉ

Chapitre IX

TRANSFORMATEURS

Chapitre X

MOTEURS ASYNCHRONES

Chapitre XI

MACHINES SYNCHRONES

Chapitre XII

MACHINES À COURANT CONTINU

Chapitre XIII

REDRESSEURS

Chapitre XIV

APPAREILS DE MESURE ÉLECTRIQUES

Chapitre XV

COMMANDE ÉLECTRIQUE